



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Návrh přívodu paliva pro experimentální
jednoválcový vodíkový motor

Fuel system for a hydrogen single cylinder
research engine

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2022

Tadeáš ČÍŽEK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce: Ing Jiří Vávra, Ph.D



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Čížek** Jméno: **Tadeáš** Osobní číslo: **491157**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh přívodu paliva pro experimentální jednoválcový vodíkový motor

Název bakalářské práce anglicky:

Fuel System for a hydrogen single cylinder research engine

Pokyny pro vypracování:

Proveďte literární rešerži možností nepřímé tvorby směsi pro vodíkový spalovací motor pro pohon nákladního vozidla. Pro experimentálního jednoválcového vodíkový motor o vrtání 120 mm a zdvih 140 mm, navrhnete přívod vodíku do sacího potrubí motoru. Proveďte návrh komponent pro dosažení požadovaných energetických parametrů motoru.

Seznam doporučené literatury:

SAE Digital Library
CAD modely válcové jednotky

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Vávra, Ph.D. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.04.2022** Termín odevzdání bakalářské práce: **13.07.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Jiří Vávra, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Oldřich Vítěk, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Anotační záznam

Jméno autora: Tadeáš Čížek

Název práce: Návrh přívodu paliva pro experimentální jednoválcový vodíkový motor

Anglický název: Fuel system for a hydrogen single cylinder research engine

Rozsah práce:

- 45 stran
- 27 obrázků
- 3 tabulky
- 8 grafů

Akademický rok: 2021/2022

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Jiří Vávra, Ph.D

Klíčová slova: Vodík, vodíkový spalovací motor, palivový systém, bakalářská práce

Key words: Hydrogen, hydrogen internal combustion engine, fuel system, bachelor thesis



Abstrakt

Tématem bakalářské práce je návrh přívodu vodíku do spalovacího jednoválcového motoru o vrtání 120 mm a zdvihu 140 mm. Motor byl konvertován ze vznětového na zážehový. Práce se v první části zabývá vlastnostmi vodíku jako paliva ve spalovacím motoru. Dále je porovnáno přímé a nepřímé tvoření palivové směsi. Poté je stanoven požadovaný hmotnostní průtok palivové soustavy na základě výkonnostních požadavků motoru a zvolen vhodný vstřikovač. Na základě toho je vytvořen 3D model palivové soustavy motoru.

Abstract

The subject of this bachelor thesis is a concept of a fuel supply for an internal combustion hydrogen engine with bore 120 mm and stroke 140 mm. The engine has been converted from a compression-ignition engine into a spark-ignition engine. First part of the thesis is dedicated to the characteristics of hydrogen as a fuel in an internal combustion engine. Then a comparison is made between direct and port fuel injection. Afterwards, the necessary fuel mass flowrate is calculated based on the power requirement of the engine and a suitable injector is chosen. On the basis of this a 3D model of the engine fuel system is created.



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Návrh přívodu paliva pro experimentální jednoválcový vodíkový motor” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne: 12.7.2022

.....

(podpis autora)



Poděkování

Rád bych zde poděkoval Ing. Jiřímu Vávrovi, Ph.D za trpělivé, vstřícné a profesionální vedení mé bakalářské práce, pečlivou formulaci tématu a cílů práce a cenné rady, které pomohly utvořit její finální formu. Rovněž bych chtěl poděkovat Prof. Ing. Celestýnu Scholzovi, Ph.D za ochotné poskytnutí podkladů k teoretické části práce.



Obsah

1 Úvod.....	9
2 Vodík jako palivo.....	10
2.1 Výroba vodíku.....	10
2.2 Skladování vodíku.....	11
2.2.1 Stlačený vodík.....	11
2.2.2 Zkapalněný vodík.....	12
2.2.3 Skladování vodíku v hydridech.....	12
2.2.4 Kryogenně-stlačený vodík.....	13
3 Vodík ve spalovacím motoru.....	14
3.1 Vysoká výhřevnost.....	14
3.2 Nízká hustota.....	14
3.3 Široký rozsah hořlavosti.....	14
3.4 Nízká iniciační energie.....	15
3.5 Malá zhášecí vzdálenost.....	15
3.6 Vysoká teplota samovznícení.....	15
3.7 Vysoká rychlost šíření plamene.....	15
3.8 Vysoká difuzivita.....	15
4 Současný stav vodíkových spalovacích motorů.....	16
4.1 Práce univerzity Karel de Grote.....	16
4.2 Práce TU Gratz.....	18
4.2.1 Režim Twin PFI.....	18
4.2.2 Režim DI.....	19
4.3 Práce ČVUT.....	20
5 Varianty přívodu paliva.....	21
5.1 Přímé vstřikování.....	21
5.2 Nepřímé vstřikování.....	22
5.3 Výběr vstřikovacího systému.....	22
6 Stanovení požadovaného průtoku.....	23
6.1 Vnější charakteristika motoru.....	23
6.2 Účinnost motoru.....	24
6.3 Součinitel přebytku vzduchu.....	24



6.4 Výpočet doby vstřikování	25
6.5 Stechiometrický koeficient	25
6.5.1 Bilanční rovnice spalování vodíku	25
6.5.2 Výpočet molární hmotnosti vzduchu	25
6.5.3 Stechiometrický koeficient H ₂ (anglicky - Air/Fuel ratio) [10]:.....	25
6.6 Objem spalovací komory zabíraný H ₂ při stechiometrické směsi:	25
6.7 Násobek tlaku přeplňování.....	26
6.8 Hmotnost vodíku nasávaného při jednom pracovním cyklu.....	26
6.8.1 Za normálních podmínek.....	26
6.8.2 Pro přeplňovaný motor	26
6.9 Požadovaný hmotnostní průtok paliva.....	26
6.10 Program Excel	27
6.11 Kontrola výsledku	27
7 Varianty vstřikovačů	28
7.1 Clean Air Power	28
7.1.1 Vstřikovač SP-014	29
7.2 Bosch NG12	30
7.3 Volba vstřikovače.....	30
8 Konstrukční řešení	31
8.1 Model sání	31
8.1 Model konstrukce.....	32
8.2 Průtržná membrána.....	33
8.3 Vstřikovací soustava SP-014	34
9 Závěr	40
10 Bibliografie.....	41
11 Seznam obrázků.....	43
12 Seznam grafů	44
13 Seznam tabulek	44
14 Seznam zkratk a symbolů	45



1 Úvod

V dnešní době jezdí po silnicích celého světa přes miliardu vozidel. S ohledem na to, že většina z nich je poháněna jednotkami spalujícími fosilní paliva, řadí se tyto prostředky mezi významné znečišťovatele ovzduší. Vypouštěním skleníkových plynů (oxid uhličitý, oxidy dusíku, oxidy síry) dochází k nežádoucím vlivům na životní prostředí, především ke globálnímu oteplování.

Proto existuje snaha snižovat emise skrze legislativu zavedením flotilového limitu emisí pro automobilový průmysl. Tímto způsobem jsou emise vozidel snižovány již desítky let. Avšak v dnešní době jsou požadavky na emise spalovacích motorů tak přísné, že je nelze splnit při spalování fosilních paliv, poněvadž produktem dokonalého spalování uhlovodíků je oxid uhličitý, což spolu pevně váže účinnost a emise. Další zvyšování účinnosti těchto motorů je neúměrně nákladné a není v něm již příliš velká rezerva pro zlepšení. Kvůli tomu se stává zajímavou variantou řešení spalování vodíku místo fosilních paliv.

Vodík má oproti fosilním palivům zásadní výhodu v tom, že při jeho dokonalém spalování nedochází k tvorbě oxidu uhličitého. Při spalování vodíku s atmosférickým vzduchem obsahujícím velký podíl dusíku vznikají vlivem vysokých teplot oxidy dusíku, jejichž tvorbu lze minimalizovat spalováním velmi chudé směsi a dodatečnou úpravou výfukových plynů.

V porovnání mezi spalováním vodíku a použitím vodíkového článku má spalování výhodu v tom, že jej lze aplikovat na již existující motory. Technologie na výrobu spalovacích motorů jsou ověřené a vyvinuté. Pro výrobu vodíkových článků je zapotřebí těžit exotické materiály (např. platinu), kdežto materiály spalovacích motorů jsou recyklovatelné. Pro palivové články je také zapotřebí velmi čistého vodíku (vodík 4.0 = 99,99 % čistého vodíku), při použití kontaminovaného vodíku dochází k degradaci palivového článku. Pro spalování lze využít i vodík s kontaminanty. V dnešní době ještě není rozvinutá distribuční síť vodíku (v Čechách pouze jedna v Havířově), proto by bylo výhodné mít motor schopný fungovat na více druhů paliv (např. vodík a CNG), což je možné u spalovacích motorů.

Jednou z možností přivádění vodíku do spalovacího motoru je nepřímá tvorba směsi, čímž se zabývá tato práce. Komponenty jsou navrženy s ohledem na energetické parametry motoru (zadaná vnější charakteristika). Práce je provedena na experimentálním zážehovém jednoválcovém motoru, který vznikne konverzí vznětového motoru z nákladního vozidla.

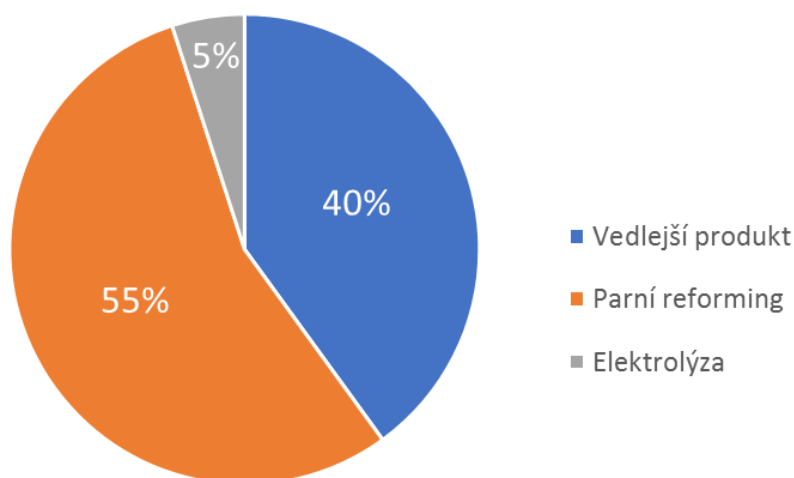


2 Vodík jako palivo

S ohledem na to, že vodík není primárním zdrojem energie, je nutné před jeho použitím zvážit ekologické důsledky jeho výroby a uskladnění (distribuce).

2.1 Výroba vodíku

Ročně je celosvětově produkováno přes 50 milionů tun vodíku. Z toho je 40% vedlejším produktem průmyslových procesů jakožto výroba chloru, rafinace surové ropy, či výroba metanolu. Dalších 55% je vyrobeno především z uhlovodíků. Zbýlých 5% je produkováno elektrolýzou viz graf 1 [1].



Graf 1 - Zdroje vodíku [1]

Nejpoužívanější metodou výroby vodíku je parní reforming, neboli štěpení zemního plynu. Existují i další způsoby získávání vodíku mezi něž patří zplynování biomasy nebo biologické a foto-chemické procesy. Tyto metody jsou však stále ve fázi výzkumu a nejsou využívány ve větším měřítku. V současné době je jediným používaným bezemisním zdrojem vodíku elektrolýza. Tu lze považovat za bezemisní jen za předpokladu, že elektrická energie použitá k tomuto procesu pochází z obnovitelných zdrojů jako jsou větrné, vodní a solární elektrárny [1,2].

Vodík se dělí dle produkce CO₂ vypuštěného do ovzduší při jeho výrobě. Nízkouhlíkový vodík při výrobě zapříčiní uvolnění maximálně 131,04 g CO₂/kWh, označuje se jako „zelený vodík“ a lze ho vyrobit způsoby nezávislymi na fosilních palivech. Vodík získávaný z fosilních paliv je označován jako „šedý vodík“, pokud je původem ze zemního plynu, nebo jako „hnědý vodík“, pokud je získávaný z uhlí. Pokud se při výrobě vodíku z fosilních paliv uvolněný CO₂ zachytává a ukládá (technologie CCS - Carbon Capture and Storage), pak ho lze označit jako „modrý vodík“ [3, 4].



2.2 Skladování vodíku

Vodík vykazuje nejvyšší energetickou hustotu ze všech paliv: výhřevnost vodíku je 120 MJ/kg. Vodík má ale nízkou objemovou energetickou hustotu, což komplikuje jeho skladování. Obzvláště v automobilovém průmyslu je pak jeho skladování nákladné.

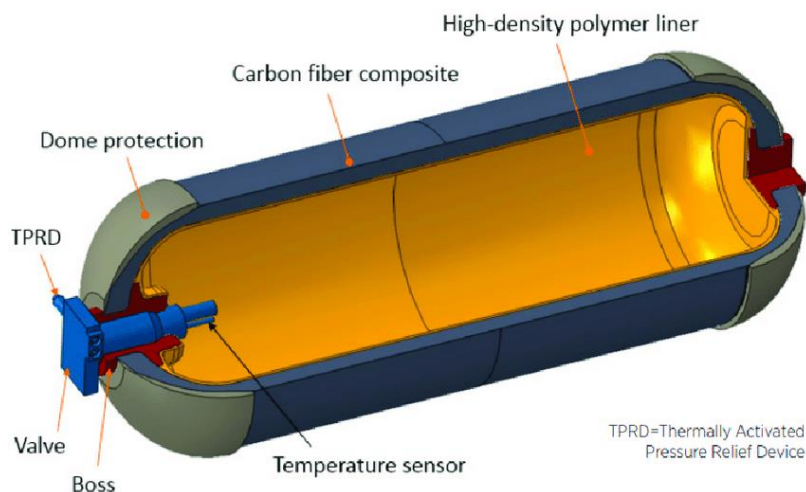
Za normálních podmínek je vodík v plynném stavu, ale dá se skladovat i jako kapalina nebo pevná látka. V případě skladování vodíku v pevné látce, není vodík čistý, ale je obsažen v chemické sloučenině. Při skladování vodíku ve vozidlech se nejčastěji používá stlačeného nebo zkapalněného vodíku.

2.2.1 Stlačený vodík

Skaldování vodíku ve formě stlačeného plynu je v dnešní době nejběžnějším způsobem. Běžné tlakové lahve jsou natlakovány na 100 až 200 barů, ale nádrže vozidel s palivovými články užívají tlak 250 až 350 barů. Testují se i varianty o tlacích 700 a 800 barů, dosahující hustoty 36 kg/m³, pro zvýšení dojezdu osobních vozidel. Tlakové lahve na stacionární užití jsou zhotoveny z oceli, ale u aplikací cílených na mobilitu, kde jsou požadavky na minimální hmotnost, je výhodné využít nádrže z kompozitů. Kompozitní nádrž (viz obr. 1) je vyrobena z polymeru, který zabraňuje unikání vodíku. Pro vytužení je polymerové jádro nádrže obaleno uhlíkovými vlákny, jejichž pevnost umožňuje veliké natlakování vodíku. V porovnání se zkapalněním je energie potřebná ke stlačení vodíku malá [5, 6].

Při distribuci vodíku skrze potrubí operující při 100 barech je vodík stlačen v čerpací stanici na 400 barů (pro vozidla s nádrží 350 bar). Tento proces vyžaduje 3 % energie obsažené ve vodíku - ztráta 3,6 MJ/kg. Při stlačení na 800 barů (pro vozidla s nádrží 700 bar) je vyžadováno až 12 % energie - ztráta 14,4 MJ/kg [7].

Při distribuci vodíku skrze nákladní dopravu dojde k prvotnímu stlačení na 200 barů - ztráta 8 % energie (9,6 MJ/kg). Po distribuci je vodík skladován v čerpací stanici při 100 barech, kde je před čerpáním znovu stlačen na 400 barů - další ztráta 3 % (3,6 MJ/kg) [7].



Obr. 1 - Kompozitní nádrž stlačeného vodíku [6]

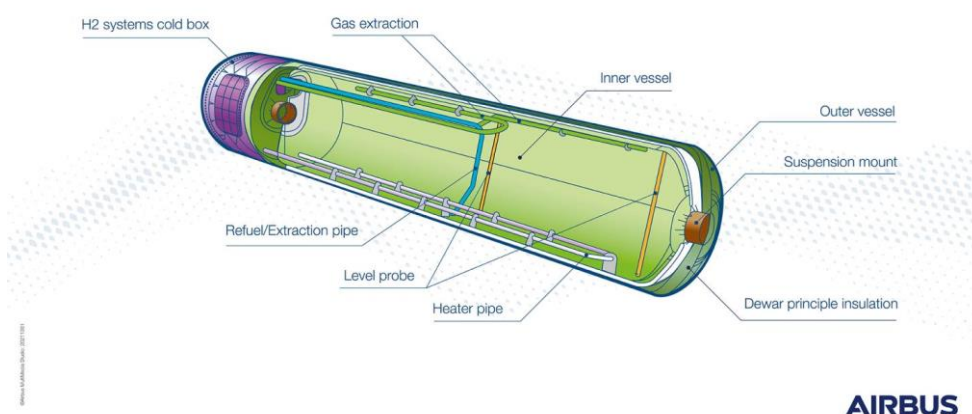


2.2.2 Zkapalněný vodík

Vodík lze skladovat ve zkapalněné formě ochlazením na 20 K (-253 °C) v kryogenní nádrži při atmosférickém tlaku. Hustota zkapalněného vodíku je 70,8 kg/m³, což je srovnatelná hodnota s hustotou solidu: 70,6 kg/m³ [8].

Tato přeměna plynu na kapalinu umožňuje přepravu velkého množství vodíku pomocí železnice, silniční a lodní nákladní dopravy. Nevýhodou tohoto způsobu je velká energetická náročnost samotného zkapalnění - ztráta 23 až 40 % energie ve vodíku (27,6 až 48 MJ/kg) [3]. Další energie se ztrácí skrze odpařování, to činí 3 až 4 % denně. Nádrž na zkapalněný vodík (viz obr. 2) je tvořena vnitřní a vnější nádobou, mezi kterými je vakuum. Pro izolaci nádrže je vakuová část vyplněna speciálním materiálem schopným dobře izolovat za velmi nízkých teplot (veliký teplotní rozdíl). Tento materiál minimalizuje přenos tepla vyzařováním [9, 10].

Liquid H₂ tank



Obr. 2 - Nádrž na zkapalněný vodík [10]

2.2.3 Skladování vodíku v hydridech

Vodík lze také skladovat ve formě pevné látky, kdy je vodík obsažen v chemické sloučenině (hydrid). Lze také použít materiál schopný absorbovat vodík (aktivní uhlí nebo uhlíkové nano-trubice) [11]. Tato řešení zatím nebyla použita v žádných prototypch z důvodu vyšší hmotnosti a z důvodu vysokých ztrát při výrobě hydridů [7].



2.2.4 Kryogenně-stlačený vodík

Další možností skladování vodíku je kryogenně-stlačený vodík (anglicky - cryo-compressed hydrogen). Je to kombinace stlačeného vodíku (240 barů) a jeho ochlazení na velmi nízkou teplotu (20 K). Vodík se takto dá skladovat ve zkapalněné formě, ve formě ochlazeného stlačeného vodíku nebo ve formě syté kapaliny. Ve výsledku lze dosáhnout hustoty 87 kg/m³, což je vyšší hodnota než hustota solidu (70,6 kg/m³).

Výhodou tohoto systému oproti čistě stlačenému vodíku je nižší tlak skladování (méně než 300 barů oproti 700 barům), což snižuje pevnostní požadavky nádrže a lze tak použít menšího množství drahých materiálů (kompozitů s uhlíkovými vlákny). V porovnání se zkapalněným vodíkem (o atmosférickém tlaku) je díky tlakové rezervě nádrže prodloužena doba, ve které ještě nedochází k nutnosti odpouštění odpařeného vodíku. Další výhodou je možnost tankování jak zkapalněného vodíku pro delší dojezd, tak vodíku stlačeného pro kratší cesty [12, 13].



3 Vodík ve spalovacím motoru

Z důvodu emisních limitů pro spalovací motory začalo být zajímavé použití alternativních paliv. Poněvadž vodík ve své molekule neobsahuje uhlík, neprodukuje jeho spalování žádné emise oxidu uhličitého (CO₂). Jeho dokonalým spálením vzniká pouze vodní pára. Avšak z důvodu přítomnosti dusíku v atmosféře vznikají za vysokých teplot ve spalovacím prostoru také oxidy dusíku (NO_x). Vodík má odlišné vlastnosti pro spalování ve srovnání s fosilními palivy.

3.1 Vysoká výhřevnost

Vodík má výhřevnost 120 MJ/kg, což je v porovnání s motorovou naftou (43 MJ/kg) téměř trojnásobná hodnota [14].

3.2 Nízká hustota

Pro použití vodíku na pohon vozidel je problematická velmi nízká hustota vodíku: 0,0899 kg/m³. Rozhodujícím parametrem pro výkonnost spalovacích motorů je objemová výhřevnost směsi, která pro vodík vychází méně příznivě ve srovnání s konvenčními palivy (viz. tab. 1). Tato skutečnost má za následek to, že vodík i přes svoji téměř trojnásobnou výhřevnost potřebuje vyšší zdvihový objem než konvenční paliva pro dosažení stejného výkonu. Vodík je také nutné stlačit nebo zkapalnit pro dosažení kompaktních rozměrů nádrže s dostatečným dojezdem vozidla [8, 15].

Nevýhodou je také požadavek na vysoký objemový průtok vstřikovačů.

	Metan	Propan	Butan	Vodík	
Chemický vzorec	CH ₄	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	H ₂	
Výhřevnost paliva	49,4	46,3	45,7	118	MJ/kg
	35,6	87	111,5	10,7	MJ/m ³
Výhřevnost směsi ($\lambda = 1$)	3,38	3,51	3,48	3,17	MJ/m ³

Tab. 1 - Vlastnosti některých plynných paliv [15]

3.3 Široký rozsah hořlavosti

Vodík má široký rozsah hořlavosti v porovnání s ostatními palivy. Lze tedy provozovat vodíkový motor spalující velmi chudou směs vzduchu a vodíku (hoří i směs s pouhými 4 % objemu vodíku). Spalováním chudé směsi lze minimalizovat emise NO_x. Se snižující se bohatostí směsi prudce klesá rychlost šíření plamene, což vede ke ztrátě výkonu a nestabilnímu spalování [16].



3.4 Nízká iniciační energie

Vodík má přibližně o řád nižší iniciační energii než benzin. Díky tomu lze snadno a spolehlivě zapálit chudou směs, lze použít zapálení svíčkou. Nevýhodou je to, že se směs vzduchu a vodíku může vznítit o rozpálený povrch (např. výfukový ventil) nebo se vznítit od zbytkových spalin v motoru. Směs může tímto způsobem při nepřímém vstřikování zažehnout v sání motoru (anglicky - backfire), což může poškodit sání a vstřikovací soustavu [17].

3.5 Malá zhášecí vzdálenost

Zhášecí vzdálenost je vzdálenost od povrchu válce motoru, v které již dochází k uhašení plamene. Zhášecí vzdálenost benzínu je větší než u vodíku. Menší zhášecí vzdálenost směsi vzduchu a vodíku má za následek vyšší tepelné namáhání vnitřních povrchů spalovacího prostoru a zvýšené riziko zpětného zášlehu do sání.

3.6 Vysoká teplota samovznícení

Vysoká teplota samovznícení nám dovoluje použít vyšší kompresní poměr, což má pozitivní dopad na účinnost motoru. Ale směs by se takto špatně kompresně zapalovala při použití ve vznětovém motoru [16].

3.7 Vysoká rychlost šíření plamene

Plamen se při stechiometrické směsi vodíku a vzduchu šíří téměř o řád rychleji než u benzínu, což přibližuje oběh motoru ideálnímu cyklu (vyšší účinnost). Avšak s chudší směsí rychlost šíření plamene prudce klesá [16].

3.8 Vysoká difuzivita

Vodík má podstatně vyšší difuzivitu než benzin. To má pozitivní vliv na tvorbu homogenní směsi pro spalování (vodík se dokáže rychleji rozptýlit ve vzduchu). Nevýhodou difuzivity vodíku jsou materiálové požadavky na vstřikovací soustavu: není vhodné použít materiál náchylný na vodíkovou křehkost. Vodík také při nižších teplotách a vyšším tlaku způsobuje oduhličení oceli [18].

Dopad uvedených vlastností na parametry motoru je potřeba experimentálně ověřit, což je předmětem připravovaného výzkumného stanoviště.



4 Současný stav vodíkových spalovacích motorů

V této kapitole jsou představeny předchozí studie vodíkových spalovacích motorů. Zaměřuje se na parametry výkonu, tepelné účinnosti a emisí NOx v závislosti na bohatosti směsi vzduchu a vodíku a systému přípravy této směsi.

4.1 Práce univerzity Karel de Grote

V roce 2011 proběhla na univerzitě Karel de Grote studie, ve které bylo vozidlo na zemní plyn upraveno pro spalování vodíku (viz obr. 3). Jedná se o vůz Opel Combo 1,6 CNG. V této studii bylo důležité dosáhnout minimálních nákladů na úpravu, proto bylo výhodné zvolit vozidlo již poháněné plynným palivem, jelikož u něj bylo jednoduché zastavět nádrže na vodík (bez nutnosti zasahovat do karoserie, či interiéru). Konverze se dosáhlo přidáním lišty s vstřikovači do sání motoru, směs vodíku a vzduchu tak byla připravována nepřímo. Pro vstřikování vodíku bylo využito 8 vstřikovačů (dva na válec) Keihin, ty byly původně určeny pro vstřikování LPG. Parametry atmosférického motoru viz tab. 2 [19].



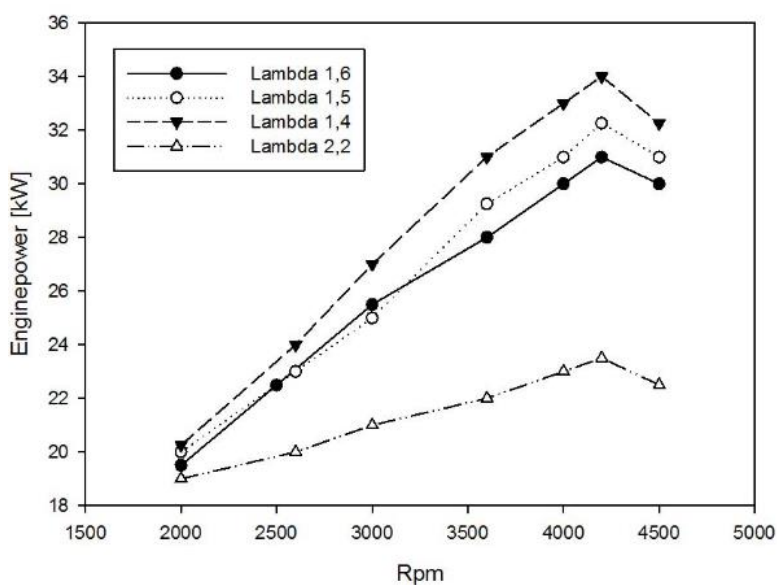
	Opel Combo
Zdvihový objem	1,598 l
Vrtání x zdvih	79 x 81,5 mm
Počet válců	4
Kompresní poměr	12,5:1
Palivo	CNG
Zapalování	svíčkou
Vstřikovací systém	PFI
Výkon na CNG (6200 ot./min)	61 kW

Tab. 2 - Parametry motoru [19]

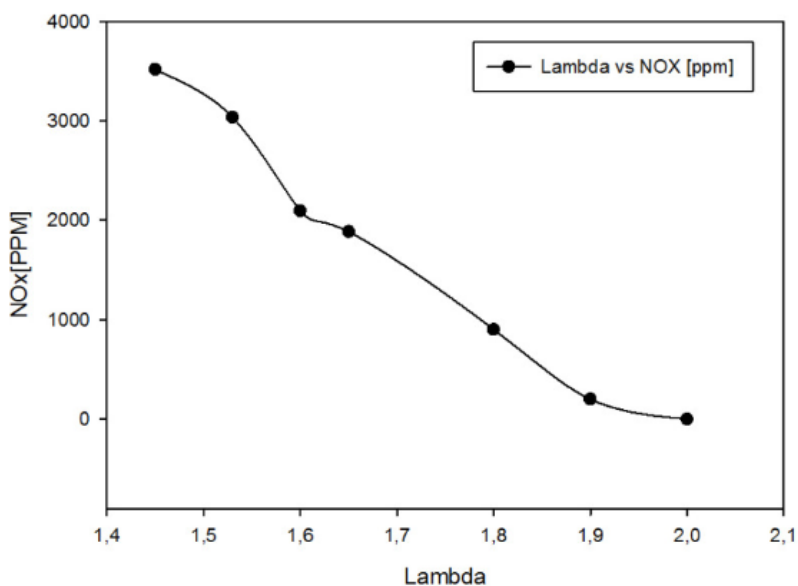
Obr. 3 - (1) - zapalovací modul, (2) - snímač tlaku, (3) - vstřikovače H₂, (4) - tlakový regulátor [19]



Nejbohatší směs vodíku, se kterou bylo možné motor provozovat byla $\lambda = 1,4$. Za těchto podmínek bylo dosaženo nejvyššího výkonu 34 kW (viz graf 2), což je při srovnání s původním výkonem CNG (61 kW) o 44 % méně. Při spalování bohaté směsi také došlo k nejvyšším emisím 3315 ppm NOx. Při $\lambda = 2,2$ byly emise NOx zanedbatelné, avšak výkon byl pouhých 23,5 kW (viz graf 3), což odpovídá ztrátě 61% výkonu CNG [19].



Graf 2 - Závislost výkonu na otáčkách [19]

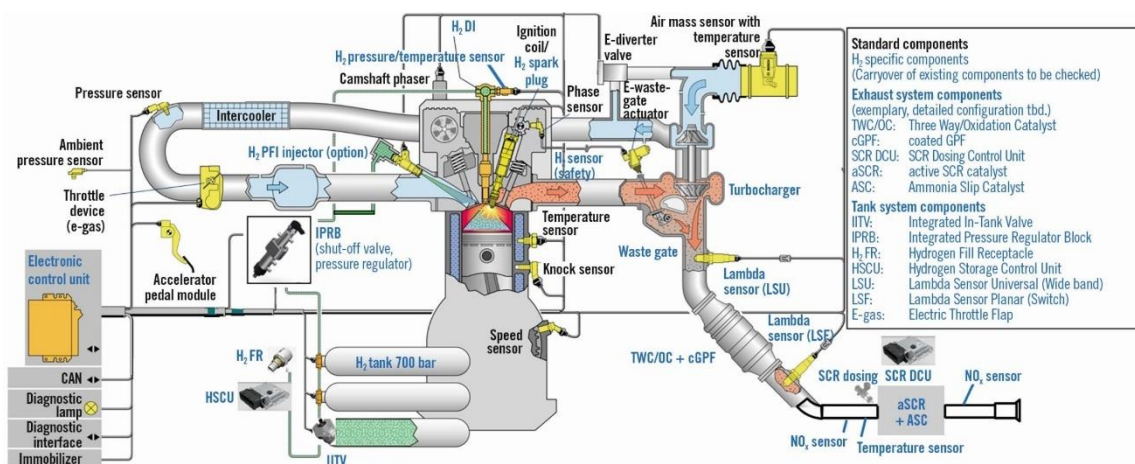


Graf 3 - Závislost NOx na lambda [19]



4.2 Práce TU Gratz

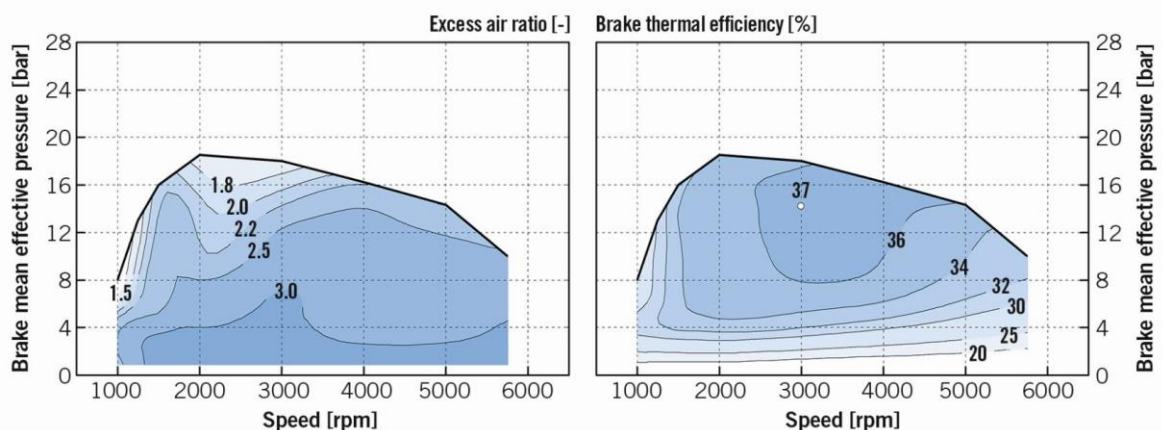
TU Gratz ve spolupráci s firmou Bosch provedla výzkum na dvoulitrovém čtyřválcovém motoru. Motor byl zážehový s přímým vstřikováním benzínu. Benzinový vstřikovač byl nahrazen vstřikovačem Bosch o tlaku 170 barů, takto vysoký vstřikovací tlak byl použit pro co nejkratší dobu vstřikování. Do sání motoru byly navíc umístěny vstřikovače pro nepřímou tvorbu směsi (dva na válec - Twin PFI). Tyto vstřikovače operovaly v rozsahu 9 až 13 barů. Vznikl tak zkušební motor, který mohl být provozován buďto v režimu přímého vstřikování nebo dvojitého nepřímého vstřikování. Motor byl vybaven dodatečnou úpravou spalín pro snížení emisí (viz obr. 4), měl relativně nízký kompresní poměr 9,8:1 a byl dvojitě přeplňován [20].

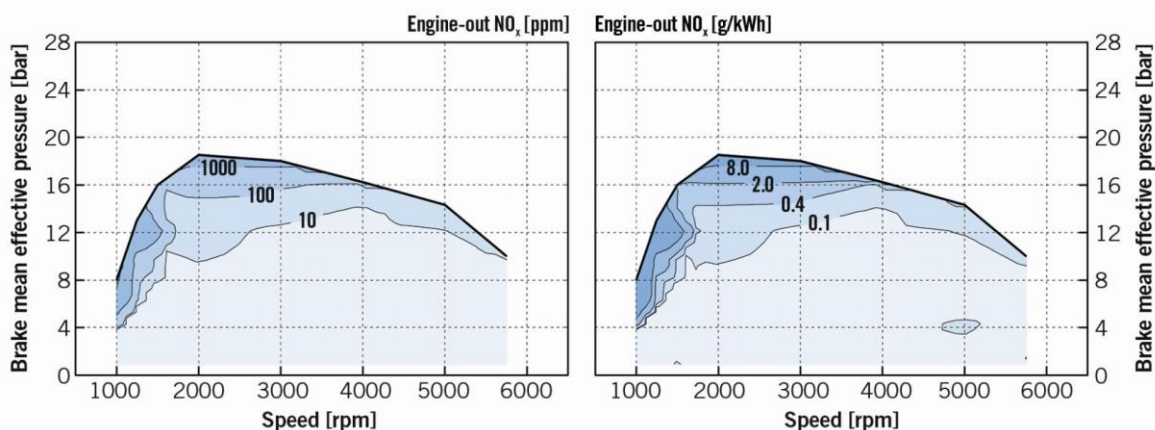


Obr. 4 - Schéma motoru TU Gratz [20]

4.2.1 Režim Twin PFI

V režimu nepřímé tvorby směsi byl vodík vstřikován pouze při otevřeném sacím ventilu, aby se předešlo nežádoucím jevům (backfiring). Motor spaloval velmi chudou směs ($\lambda = 1,8$ až $3,0$), díky čemuž byl schopen dosáhnout emisí NO_x nižších než 10 ppm. Bylo dosaženo nejvyššího výkonu 60 kW/l a tepelné účinnosti 37 % (viz graf 4). Účinnost lze výrazně zvýšit zvýšením kompresního poměru [20].

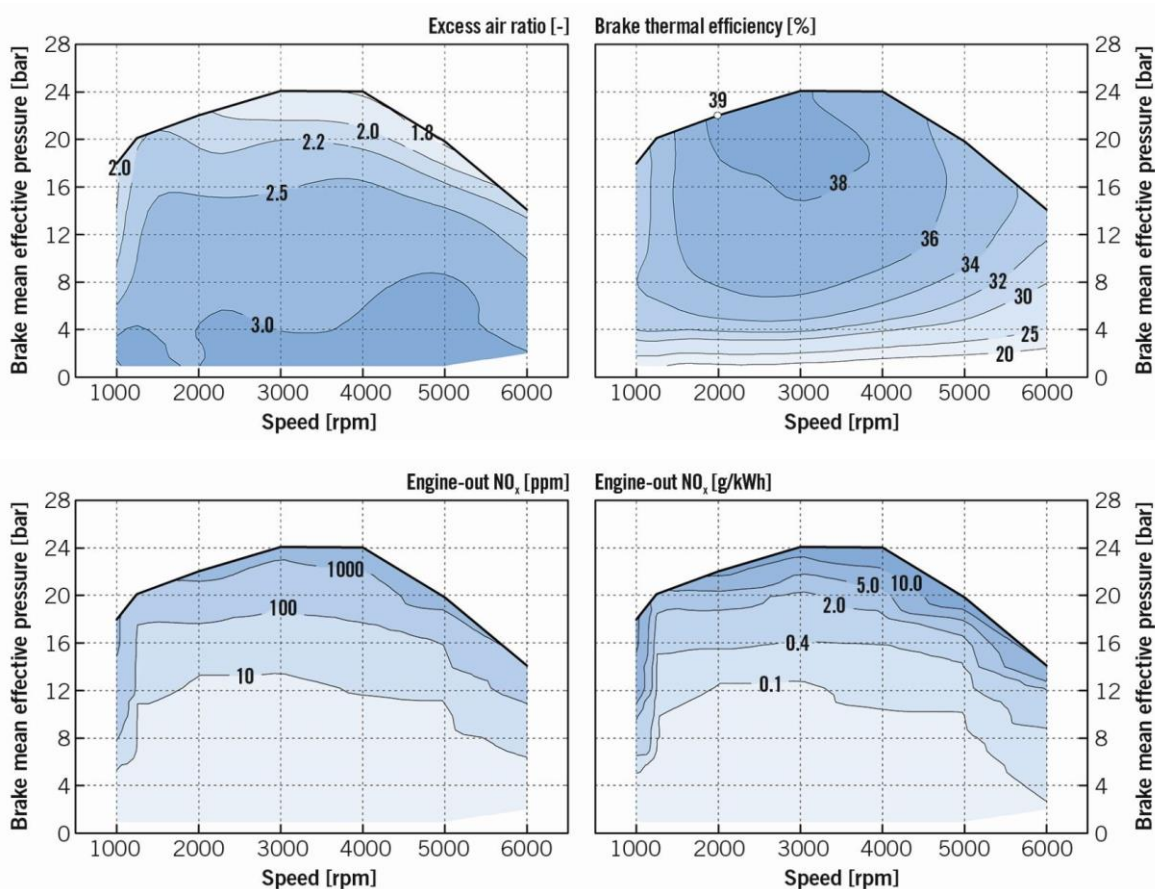




Graf 4 - Lambda, účinnost a emise NO_x v závislosti na otáčkách a zatížení (Twin PFI) [20]

4.2.2 Režim DI

V režimu přímé tvorby směsi bylo dosaženo vyšších hodnot výkonu a účinnosti, neboť vodík v tomto režimu nezabíral žádnou část objemu nasávaného vzduchu. Účinnost takto dosáhla až 39 % a maximální výkon byl 83kW/l. Motor byl schopen dosáhnout nízkých emisí NO_x (menší než 10 ppm) v širším spektru zatížení a otáček než při nepřímém vstřikování vodíku (viz graf 5) [20].

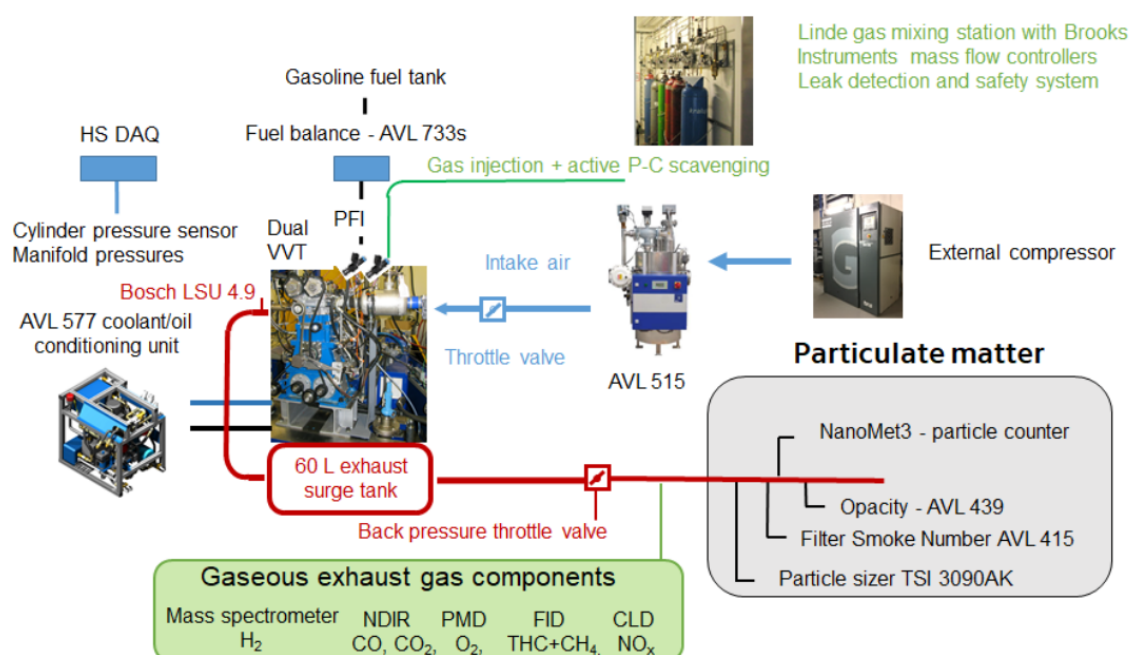


Graf 5 - Lambda, účinnost a emise NO_x v závislosti na otáčkách a zatížení (DI) [20]



4.3 Práce ČVUT

Fakulta strojní ČVUT ve spolupráci se ŠKODA AUTO a.s. vyvinula jednoválcový zážehový motor spalující vodík. Motor o objemu 0,375 l byl vybaven nepřímým vstřikováním a škrtkící klapkou ve výfuku, která sloužila jako reprezentace účinku turbodmychadla na vyplachování motoru. Místo turbodmychadla byl motor přepřínován kompresorem (viz obr. 5). U virtuálního turbodmychadla byla uvažována účinnost 50 %. Snahou bylo, aby emise NO_x nepřekročily hodnotu 10 ppm bez dodatečných úprav výfukových spalin. Kompresní poměr byl 11,6:1 a byl zde využit systém pasivní předkomůrky, která urychluje spalovací proces [21].



Obr. 5 - Schéma měřicího stanoviště motoru ČVUT [22]

Emise NO_x se podařilo pro zatížení do 15 barů (bmep) a pro široký rozsah otáček udržet pod hranicí 10 ppm bez nutnosti dodatečného upravování spalin, díky čemuž by motor splňoval emisní normu EURO 6. Takto nízkých emisí bylo dosaženo díky použití velmi chudé směsi $\lambda = 2,4$ až 3,3. Nejvyšší dosažená tepelná účinnost byla 43 %. Na základě výsledků této studie bude uvažována účinnost experimentálního motoru v kapitole 6.2 [22].



5 Varianty přívodu paliva

Volba přívodu paliva není jednoznačná a každá varianta má své výhody a nevýhody. Při použití vodíku jako paliva může špatná kombinace palivového systému a konstrukce motoru mít za následek předčasné zapálení směsi nebo nerovnoměrný chod motoru. V této práci budou zvažovány dva systémy přípravy palivové směsi: nepřímé (PFI - Port Fuel Injection) a přímé (DI - Direct Injection) [17].

5.1 Přímé vstřikování

Při přímém vstřikování je směs vzduchu a vodíku tvořena při kompresním zdvihu pístu, ve chvíli, kdy jsou sací i výfukové ventily zavřeny (vstřikovač vyústí přímo do spalovacího prostoru, viz obr. 6). Nehrozí tak vyšlehnutí plamene do sání. Je zde také potenciál vyššího výkonu: při stechiometrické směsi zabírá vodík kolem 29 % objemu této směsi (viz kapitola 6), což u nepřímého vstřikování ubírá na objemu nasávaného vzduchu. U přímého vstřikování nelze připravovat palivovou směs mimo kompresní zdvih. To značně omezuje čas dostupný pro vstřikování. Vstřikovač proto musí mít vysoký hmotnostní průtok (vodík je nutno vstřikovat za vysokého tlaku, kvůli jeho nízké hustotě). Z důvodu krátkého času na promíchání směsi je nutno i přes vysokou difuzivitu vodíku použít vysoký vstřikovací tlak. Ve výsledku jsou na takovýto vstřikovač kladeny vysoké nároky, to se odráží v jeho dostupnosti a ceně [23].

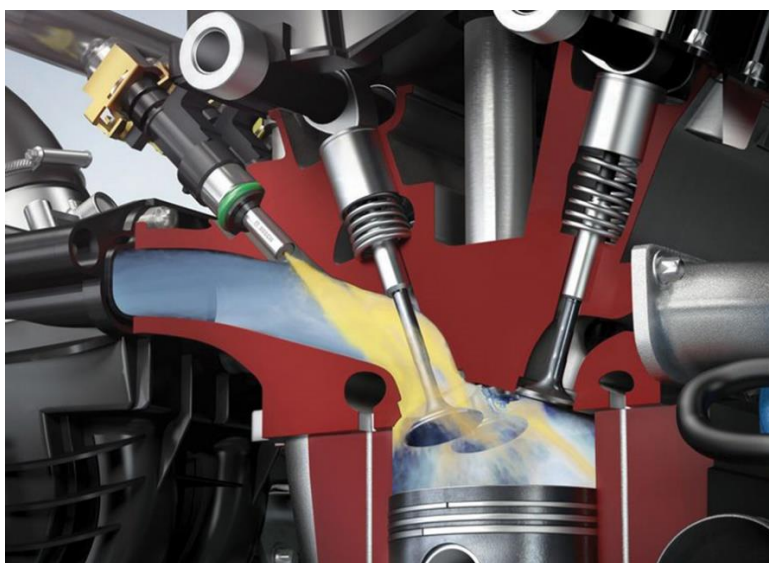


Obr. 6 - Přímé vstřikování [24]



5.2 Nepřímé vstřikování

U nepřímého vstřikování je směs tvořena převážně při otevřeném sacím ventilu (vstřikovač je umístěn v sání motoru, poblíž sacího ventilu, viz obr. 7). Vodík je možné vstřikovat i mimo sací fázi motoru, ale v sání se tak bude hromadit palivová směs, což zvyšuje riziko a následky vyšlehnutí plamene do sání. S ohledem na to, že je směs připravovaná mimo spalovací prostor, snižuje vstřikovaný vodík objem vzduchu nasávaného vzduchu, čímž se snižuje maximální výkon v porovnání s přímým vstřikováním [23].



Obr. 7 - Nepřímé vstřikování [24]

5.3 Výběr vstřikovacího systému

Při výběru vstřikovacího systému pro úpravu experimentálního motoru hraje zásadní roli dosavadní konstrukce motoru, tedy prostor, kam je možné umístit vstřikovač. Experimentální motor byl vznětový s přímým vstřikováním nafty. Při konverzi motoru na zážehový byl nahrazen vstřikovač zapalovací svíčkou, což nechává prostor na vstřikovač buďto v sání (nepřímý) nebo na místo žhavicí svíčky (přímý). Zásadní výhodou nepřímého vstřikování je lepší schopnost vytvořit homogenní směs. Riziko vyšlehnutí plamene do sání lze minimalizovat dostatečným průtokem vstřikovacího systému, kdy se bude vodík vpouštět pouze při otevřeném sacím ventilu. Rozdíl maximálního výkonu přímého a nepřímého vstřikování bude dorovnán přeplňováním motoru (přeplňování je použito hlavně pro spalování velmi chudé směsi). Z výše zmíněných důvodů a s ohledem na nedostupnost vstřikovače určeného k přímému vstřikování byla zvolena metoda nepřímého vstřikování.

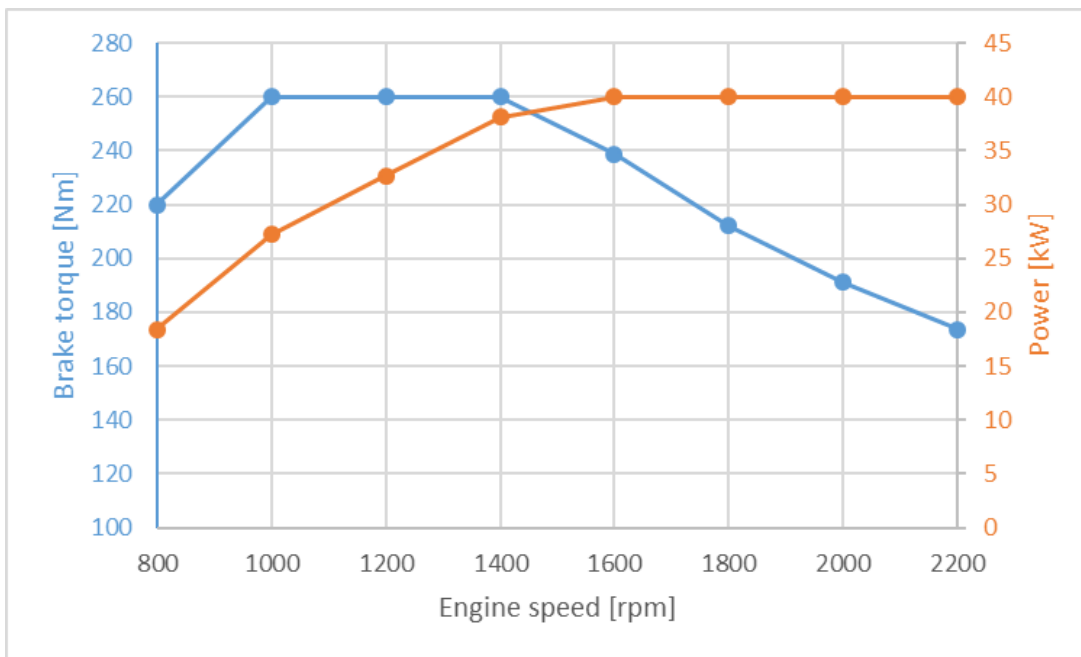


6 Stanovení požadovaného průtoku

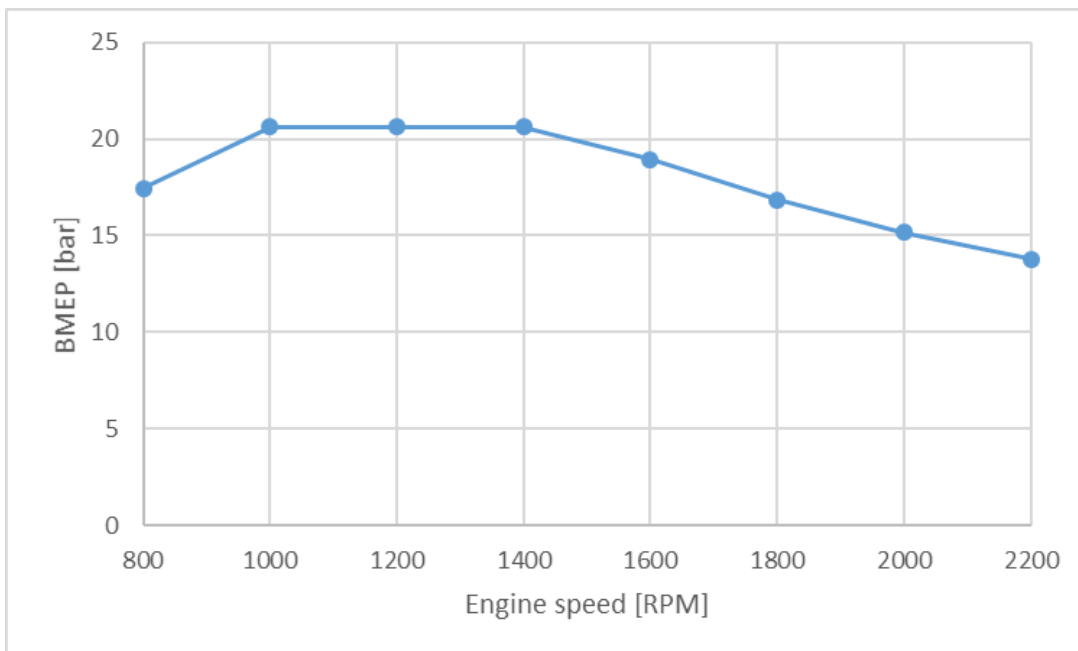
Pro správné dimenzování palivového systému je důležité znát hmotnostní průtok paliva. Tento parametr bude hlavním kritériem při výběru vstřikovače.

6.1 Vnější charakteristika motoru

Pro konkrétní projekt byla navržena tato vnější charakteristika experimentálního motoru:



Graf 6 - Závislost momentu a výkonu na otáčkách motoru



Graf 7 - Závislost efektivního středního tlaku na otáčkách motoru

V nižších otáčkách má mít motor vysoký točivý moment 260 Nm a ve vyšších otáčkách má mít výkon 40 kW (viz graf 6).



6.2 Účinnost motoru

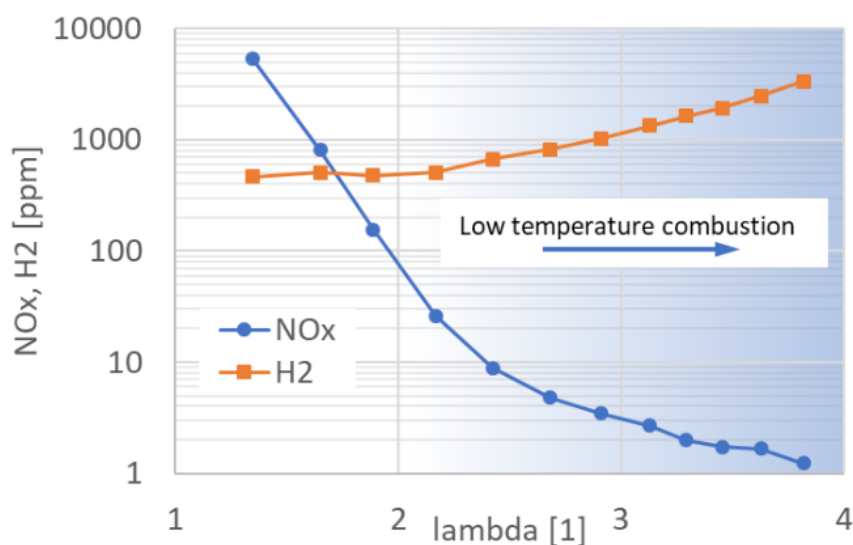
Na základě výsledků předchozí práce ČVUT ve spolupráci s firmou ŠKODA AUTO a.s. je uvažovaná tepelná účinnost experimentálního motoru 40 %, avšak skutečná účinnost se může lišit, neboť motory se mezi sebou liší v některých parametrech (viz tab. 3) [22].

	Experimentální motor	ŠKODA-ČVUT
Zdvihový objem	1,583 l	0,375 l
Maximální otáčky	2200 ot./min	6000 ot./min
Kompresní poměr	13:1	11,6:1
Palivo	vodík	vodík
Zapalování	svíčkou	svíčkou
Vstřikovací systém	PFI	PFI
Max. plnicí tlak (abs.)	3 bar	4 bar
Max. tepelná účinnost	odhad. 40 %	43,3 %

Tab. 3 - Porovnání parametrů motorů [22]

6.3 Součinitel přebytku vzduchu

Bohatost směsi je značena součinitelem přebytku vzduchu (λ - lambda). Lambda je bezrozměrná veličina značící násobek přebytku vzduchu ve srovnání se stechiometrickou směsí (směs, ve které je pro každou molekulu paliva odpovídající počet molekul vzduchu). $\lambda = 1$ značí stechiometrickou směs. $\lambda > 1$ značí chudou směs. $\lambda < 1$ značí bohatou směs. Z důvodu minimalizace emisí NO_x (snížením teploty spalování) je použita velmi chudá směs s $\lambda > 1,8$ (viz graf 8) [22, 25].



Graf 8 - Závislost NO_x na lambda [22]



6.4 Výpočet doby vstřikování

Nejpřísnější požadavky na hmotnostní průtok paliva jsou pro 1600 ot./min a $\lambda = 1,8$.

$$\text{Doba jedné otáčky: } \frac{60}{1600} = 37,5 \text{ ms}$$

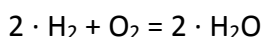
Z jedné otáčky kliky (360°) je po 145° otevřený sací ventil - tuto dobu využijeme pro vstřikování, kvůli minimalizaci rizika výšlehu do sání.

$$\text{Z toho plyne: } t^* = \frac{37,5 \cdot 145}{360} = 15,104 \text{ ms}$$

15,104 ms je k dispozici pro vstřikování paliva.

6.5 Stechiometrický koeficient

6.5.1 Bilanční rovnice spalování vodíku



K dokonalému spálení jsou potřeba 2 moly molekuly vodíku a jeden mol molekuly kyslíku.

Molární hmotnosti molekul: $M_{\text{H}_2} = 2,016 \text{ g/mol}$

$$M_{\text{O}_2} = 32 \text{ g/mol}$$

$$M_{\text{N}_2} = 28,02 \text{ g/mol}$$

6.5.2 Výpočet molární hmotnosti vzduchu

U vzduchu uvažováno 79 % dusíku a 21 % kyslíku (objemově).

$$\text{Množství dusíku na jeden mol kyslíku: } \frac{79}{21} = 3,762 \text{ mol}_{\text{N}_2}$$

Hmotnost vzduchu s obsahem jednoho molu molekuly kyslíku:

$$1 [\text{mol}_{\text{O}_2}] \cdot M_{\text{O}_2} + 3,762 [\text{mol}_{\text{N}_2}] \cdot M_{\text{N}_2} = 1 \cdot 32 + 3,762 \cdot 28,02 = 137,411 \text{ g}$$

Hmotnost vodíku pro zachování stechiometrického poměru:

$$2 [\text{mol}_{\text{H}_2}] \cdot M_{\text{H}_2} = 2 \cdot 2,016 = 4,032 \text{ g}$$

6.5.3 Stechiometrický koeficient H_2 (anglicky - Air/Fuel ratio) [10]:

$$\text{Na základě množství: } A/F = \frac{\text{mol vzduchu}}{\text{mol paliva}} = \frac{1 + 3,762}{2} = 2,381:1$$

$$\text{Na základě hmotnosti: } A/F = \frac{\text{hmotnost vzduchu}}{\text{hmotnost paliva}} = \frac{137,411}{2 \cdot 2,016} = 34,08:1$$

6.6 Objem spalovací komory zabíraný H_2 při stechiometrické směsi:

$$N_{\text{H}_2} = \frac{\text{objem vodíku}}{\text{celkový objem}} = \frac{\text{objem vodíku}}{\text{objem vzduchu} + \text{objem vodíku}} = \frac{2}{4,762 + 2} = 0,29577 = 29,577 \%$$

Pro $\lambda = 1,8$ je objem vodíku snížen následujícím způsobem:

$$\frac{\text{objem vodíku}}{\text{objem vzduchu} \cdot \lambda + \text{objem vodíku}} = \frac{2}{4,762 \cdot 1,8 + 2} = 0,18919 = 18,919 \%$$



6.7 Násobek tlaku přeplňování

Za těchto podmínek je požadován výkon 40 kW.

Předpokládá se tepelná účinnost 40 % (kapitola 6.2).

$$(1) \text{ Účinnost: } \eta = \frac{P_v}{P_p} = \frac{\text{výkon}}{\text{příkon}} [-]$$

$$(2) \text{ Příkon: } P_p = \dot{m}_{H_2} \cdot H_{uH_2} = \text{hmotnostní tok paliva} \cdot \text{výhřevnost paliva [W]}$$

(3) Hmotnostní tok paliva:

$$\dot{m}_{H_2} = m_{H_2}^* \cdot n/120 = \text{hmotnost vodíku na jeden vstřík} \cdot \text{otáčky [kg/s]}$$

Ze vztahů (1), (2), (3) a (4) lze odvodit násobek tlaku přeplňování:

$$p_{abs} = \frac{P_p}{\rho_{H_2} \cdot \frac{n}{120} \cdot N_{H_2} \cdot V_z \cdot \eta \cdot H_{uH_2}} = \frac{40}{0,0899 \cdot \frac{1600}{120} \cdot 0,189 \cdot 0,001583 \cdot 0,4 \cdot 120000000} = 2,323 [-]$$

6.8 Hmotnost vodíku nasávaného při jednom pracovním cyklu

Zdvihový objem: $V_z = 1,583 \text{ l}$

Hustota vodíku za normálních podmínek: $\rho_{H_2} = 0,0899 \text{ kg/m}^3$

6.8.1 Za normálních podmínek

Normální podmínky: tlak 101 325 Pa, teplota 20°C

$$m_{H_2}^* = V_z \cdot N_{H_2} \cdot \rho_{H_2} = 0,001583 \cdot 0,189 \cdot 0,0899 = 26,924 \text{ mg}$$

6.8.2 Pro přeplňovaný motor

$$m_{H_2} = m_{H_2}^* \cdot p_{abs} = 26,924 \cdot 2,323 = 62,529 \text{ mg}$$

6.9 Požadovaný hmotnostní průtok paliva

Za dobu otevřeného sacího ventilu 15,104 ms je potřeba vstřikovačem dopravit 62,529 mg paliva: $\dot{m}_{H_2} = m_{H_2}/t^* = 62,529/15,104 = 4,140 \text{ g/s}$

Výsledný požadovaný hmotnostní průtok paliva je 4,140 g/s.

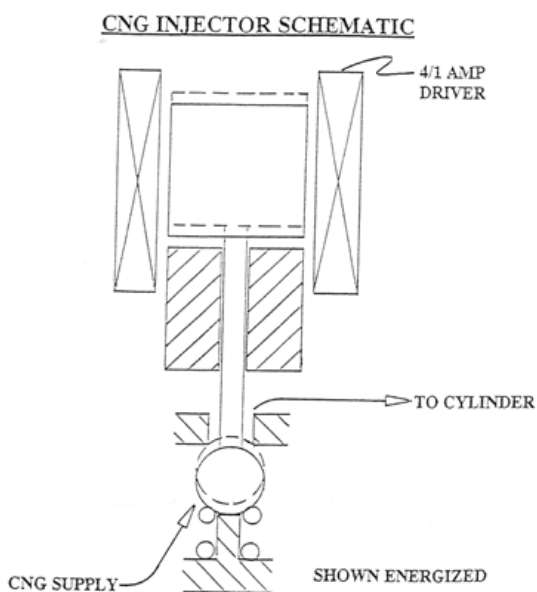


7 Varianty vstřikovačů

Při vybírání vstřikovačů hraje hlavní roli jejich hmotnostní průtok a dostupnost.

7.1 Clean Air Power

Vstřikovače řady SP od společnosti Clean Air Power (CAP) jsou určeny pro plynná paliva, především pro stlačený zemní plyn. Existují však již zkušenosti s použitím těchto vstřikovačů pro vstřikování vodíku [26]. Vstřikovače jsou z korozivzdorných materiálů, za normálních podmínek jsou zavřené a jsou ovládány solenoidem. Princip funkce viz obr. 9 [27].



Obr. 9 - Schéma vstřikovače řady SP [27]

Solenoid vstřikovače je cívka s nízkým odporem, navržena pro rychlou odezvu. Ovládán je proudem - řízení „peak and hold“. „Peak and hold“ je systém pro úsporu energie, kdy je solenoid spuštěn proudem o 4 ampérech („peak“) a poté je držen proudem o 1 ampéru („hold“). Výrobce nedoporučuje používat ovládací impulzy kratší než 4 ms, kvůli zachování rovnoměrného průtoku paliva, to ve výsledku omezuje minimální možnou dopravu paliva. Při použití vodíku jako paliva vstřikovač propouští malé množství vodíku i při zavřeném stavu (0,14 l/min, tlak 11 bar), to může mít za následek vyšlehnutí plamene do sání [26].



Obr. 10 - Vstřikovač CAP řady SP

7.1.1 Vstřikovač SP-014

Na fakultě je k dispozici vstřikovač SP-014 (viz obr. 10), který by byl vhodným kandidátem pro přívod vodíku do motoru, ale je nutné stanovit jeho průtok. Ten lze dle výrobce vypočítat dle následujícího vztahu:

$$(5) \quad \dot{m}_g = K \rho_1 \sqrt{2 \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \frac{P_1}{\rho_1} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}} \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right)}$$

Kde: \dot{m}_g = hmotnostní průtok vstřikovače

K = konstanta ventilu, pro SP-014 je $K = 9,46 \cdot 10^{-5}$

ρ_1 = hustota na vstupu = $0,9889 \text{ kg/m}^3$

γ = Poissonova konstanta = $1,41$

P_1 = absolutní tlak na vstupu = 1100 kPa

P_2 = absolutní tlak na výstupu = 232 kPa

Pro poměr tlaků P_2/P_1 menší než P_r dochází ke škrcení, v tu chvíli je nutné ve vztahu nahradit poměr tlaků hodnotou P_r , kde P_r je kritický poměr tlaků:

$$(6) \quad P_r = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}$$

Výsledný vztah pro výpočet průtoku vstřikovače byl přidán do programu Excel (viz příloha 1 - flowrate.xlsx) a při tlaku paliva 11 barů je výsledný průtok vstřikovače: $\dot{m}_g = 2,142 \text{ g/s}$
Průtok vstřikovače narůstá přibližně lineárně se zvyšováním tlaku paliva, ale od tlaku 14 barů se vstřikovač již nemusí otevřít, proto je vhodné použít nižšího tlaku.



7.2 Bosch NG12

Vstřikovače NG12 od firmy Bosch (viz obr. 11) jsou určeny pro vstřikování stlačeného zemního plynu. Byly vyvinuty přímo pro systém CNG, proto mají vysokou průtokovou rychlost, větší objem a vysokou otěruvzdornost, proto mohou být použity paliva neobsahující maziva. Je ovládán elektromagnetickým ventilem a propouští velmi malé množství paliva. Pro vstřikování vodíku sice tento vstřikovač není certifikovaný, avšak ČVUT již má zkušenost s jeho použitím v této roli. Z této předchozí zkušenosti jsou dostupná data, ze kterých lze dopočítat hmotnostní průtok vodíku tímto vstřikovačem. Při tlaku paliva 8,45 barů vyšel průtok vstřikovače: $\dot{m}_b = 0,70 \text{ g/s}$ (viz příloha 2 - Bosch.xlsx). Bohužel není dostupný průtok za vyššího tlaku paliva, proto je tato hodnota uvažována jako maximální [28].



Obr. 11 - Vstřikovač Bosch NG12 [28]

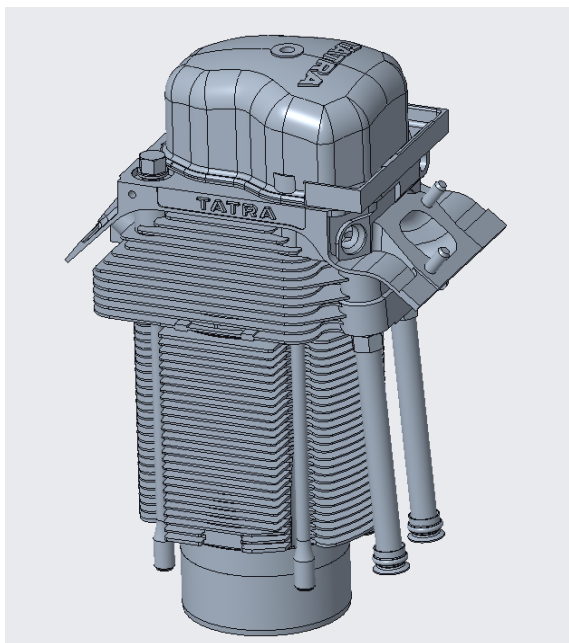
7.3 Volba vstřikovače

Obě varianty vstřikovačů jsou původně určeny pro CNG, ale obě byly úspěšně provozovány s vodíkem (krátkodobě - v řádech desítek hodin). Oba druhy vstřikovačů jsou také dostupné fakultě, proto zbývá poslední aspekt, kterým je požadovaný průtok. Hmotnostní průtok vodíku $\dot{m}_{H_2} = 4,140 \text{ g/s}$ sám o sobě nespĺňuje žádný ze vstřikovačů. SP-014 má průtok $\dot{m}_g = 2,142 \text{ g/s}$, proto je nutné použít dva vstřikovače. NG12 má průtok $\dot{m}_b = 0,70 \text{ g/s}$, což by znamenalo použití čtyř vstřikovačů a ještě by bylo nutno vstřikovat palivo i mimo otevřený sací ventil (vstřikovat 215° natočení klikové hřídele), tím by vznikalo vysoké riziko výšlehu plamene do sání. Ve výsledku byla zvolena varianta dvou vstřikovačů SP-014, která je ve srovnání se vstřikovači NG12 jednodušší. Pro NG12 byl zvažován adaptér mezi sání a hlavu motoru, to by zvětšovalo zástavbové rozměry motoru, také by byla potřeba pro řadu vstřikovačů vyrobit svařovaný rail pro vodík o vysokém tlaku, což je poměrně složitý a nákladný proces. Tyto problémy jsou řešitelné pro variantu SP-014 viz kapitola 8.3.



8 Konstrukční řešení

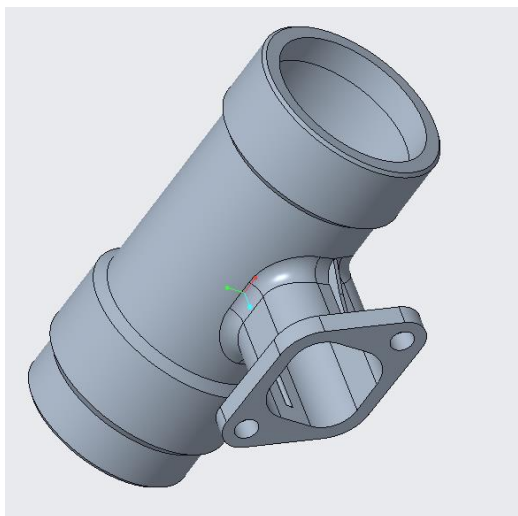
Od zadavatele projektu byl dodán experimentální motor, spolu s jeho 3D dokumentací (viz obr. 12). Tento motor je vznětový s přímým vstřikováním nafty. Skrze práce mých kolegů bude motor převeden na zážehový - vstřikovač v hlavě se nahradí zapalovací svíčkou, píst se upraví pro snížení kompresního poměru a udělají se potřebné pevnostní a teplotní simulace.



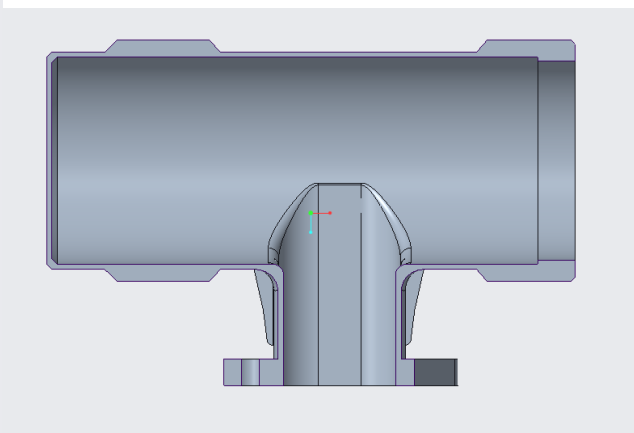
Obr. 12 - Model experimentálního motoru

8.1 Model sání

V dodané 3D dokumentaci chyběl model sání motoru, které bylo namontováno na skutečném motoru. Proto jsem daný díl změřil a vymodeloval v programu PTC Creo Parametric 4.0 (viz obr. 13 a 14).



Obr. 13 - Model sání

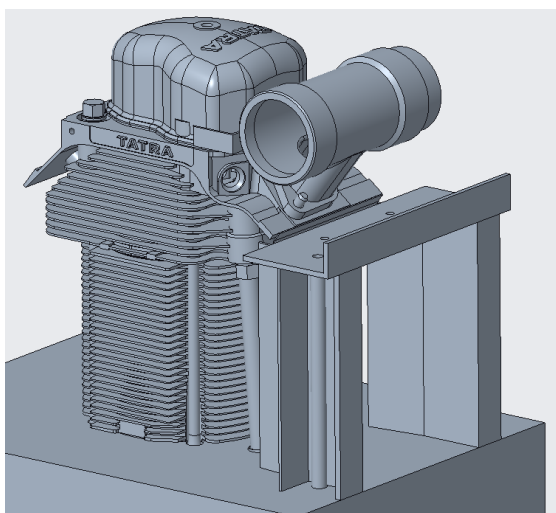


Obr. 14 - Model sání v řezu

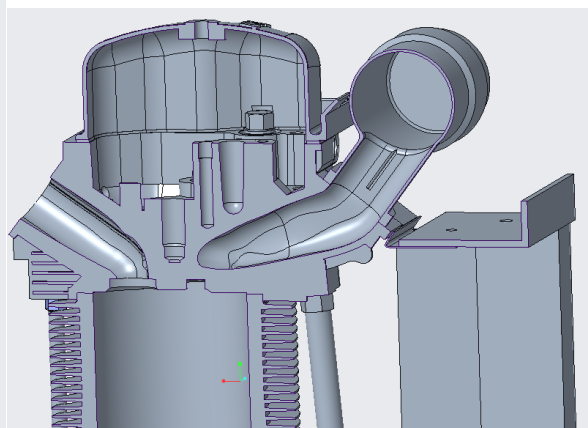


8.1 Model konstrukce

U skutečného motoru byla také namontovaná konstrukce sloužící jako součást vzduchotechniky chladící motor. V těchto místech bude ale umístěna navrhovaná vstřikovací soustava paliva. Proto bylo nutné pro prevenci kolize těchto objektů změnit konstrukci a přidat ji do modelu motoru (viz obr. 15 a 16).



Obr. 15 - Model motoru s konstrukcí

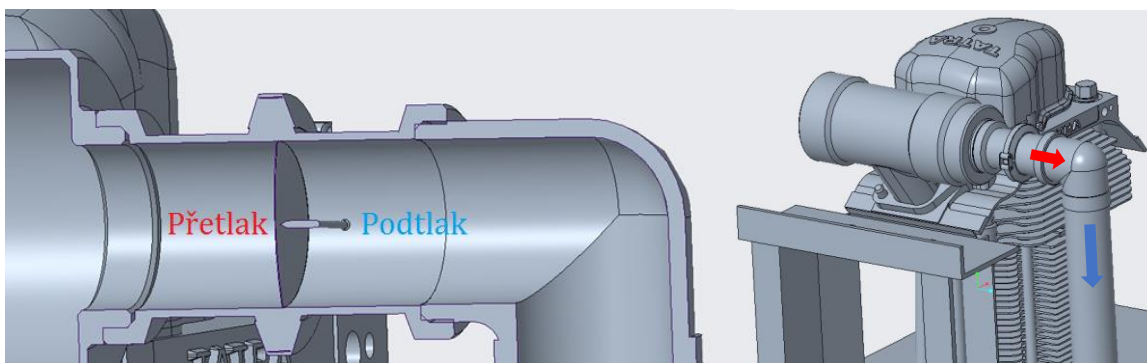


Obr. 16 - Řez celkové sestavy



8.2 Průtržná membrána

Experimentální motor bude přeplňován, proto bude v sání motoru přetlak vůči okolnímu prostředí. Za provozu bude přetlak přibližně 1 až 2 bary. Navíc může nastat situace, kdy dojde ke zpětnému vyšlehnutí plamene do sání. To způsobí náhlý nárůst tlaku, který může poškodit vstřikovací systém, čidla umístěná v sání nebo samotné sání. Proto je vhodné použít nějaký jisticí prvek, tlakový ventil nebo průtržnou membránu. Tlakový ventil má tu výhodu, že ho lze používat opakovaně, kdežto průtržnou membránu je nutno měnit. S ohledem na cenu a na zkušenost ústavu s použitím průtržné membrány, byla zvolena tato varianta. V případě protržení membrány lze šroubení rozebrat povolením svorky a tak jednoduše vyměnit membránu za novou. [29]



Obr. 17 - Průtržná membrána

Obr. 18 - Odklon přetlaku

Průtržná membrána má provozní tlak 0,2 až 3 bary, což splňuje náš požadavek. Jisticí tlak je 5 barů s tolerancí 10 %. Teplota za provozu nesmí přesáhnout 120 °C. Parametry jsou převzaty z technické dokumentace výrobce. Šroubení membrány se našroubuje na sání motoru a v případě překročení jisticího tlaku se membrána prohne, tím se perforuje o hrot a vypustí tlak do okolní atmosféry (viz obr. 17). Pro přidanou bezpečnost je tok vypouštěného média směřován směrem k zemi našroubovaným potrubím (viz obr. 18).



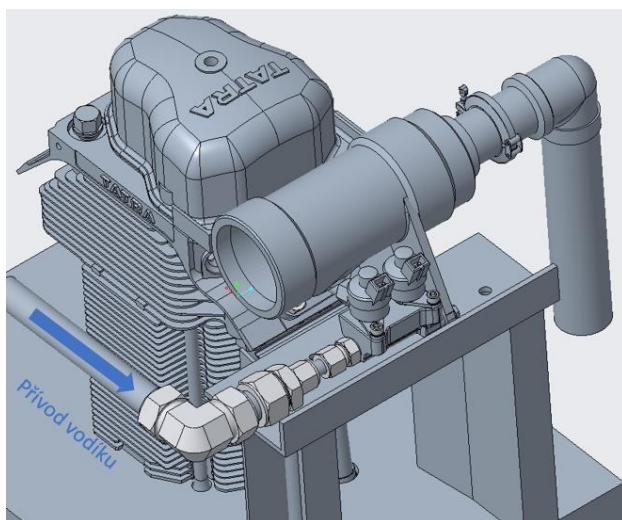
8.3 Vstřikovací soustava SP-014

U palivové soustavy je velmi důležité, aby nedocházelo k nechtěnému úniku vodíku. Proto musí být veškeré spoje utěsněné. V případě úniku vodíku by při nedostatečném odvětrávání prostor laboratoře mohlo dojít k jeho nahromadění a následné explozi. U experimentálního motoru je vodík skladován v tlakových lahvích při tlaku 200 barů, odtud je vyveden do regulátoru, který sníží tlak na 11 barů. Odtud je vodík přiveden do průtokoměru, ze kterého je dále veden do jednopalcové trubky. Z této trubky je palivo skrze šroubení Swagelok přivedeno do adaptéru vstřikovačů. Výhodou těchto šroubení je, že vytváří těsné spojení trubek bez nutnosti předchozích příprav. Utěsnění dosahují pomocí zářezných kroužků. Kroužky jsou z jedné strany tlačeny převlečnou maticí a z druhé strany jsou vedeny kuželovitým povrchem těla šroubení (viz obr. 19). Instalace takového spoje je nenáročná, což je výhodné pro kusovou výrobu experimentálních zařízení.



Obr. 19 - Schéma funkce a instalace šroubení Swagelok [30]

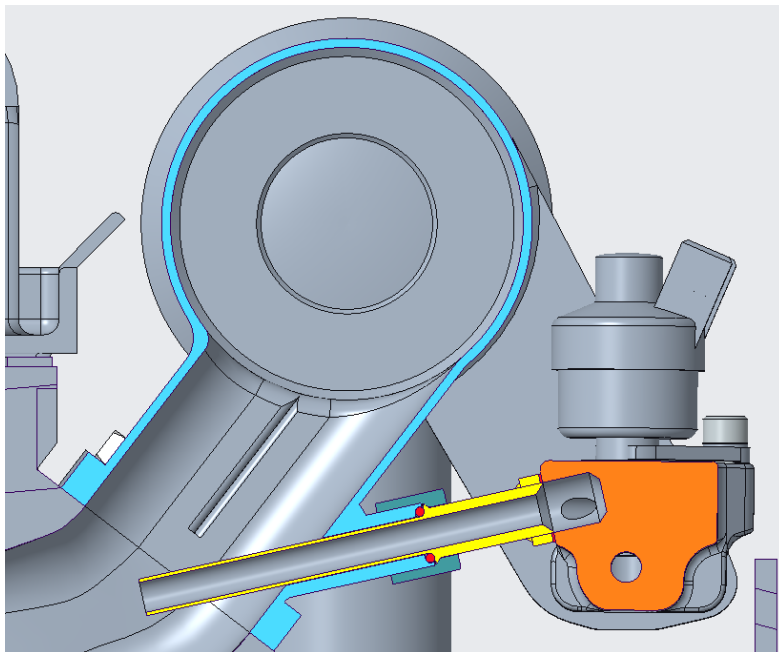
Průměr trubek přivádějící palivo je poměrně velký, aby měly co největší objem (viz obr. 20). Tento objem slouží jako vyrovnávací nádoba pro minimalizaci tlakových výkyvů přívodu paliva do vstřikovačů. Toto řešení se šroubeními a trubkami je výrazně jednodušší a levnější, než si nechávat vyrábět svařované vyrovnávací nádoby. Nevýhodou je množství spojů, které bude nutné dobře utěsnit a pravidelně kontrolovat.



Obr. 20 - Sestava motoru s přívodem paliva

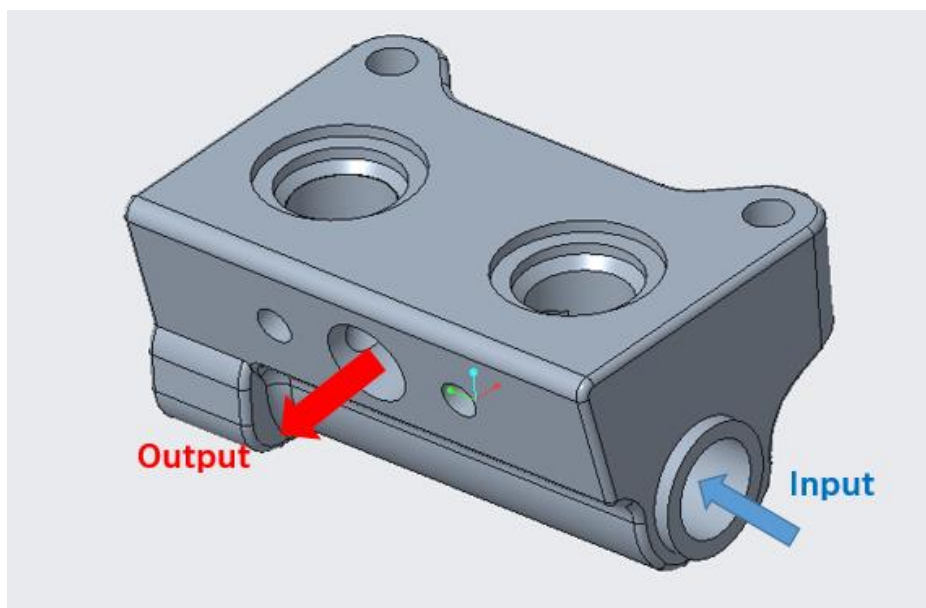


Na obr. 21 je vidět řez sestavou sání motoru. Modrou barvou je naznačeno sání, zelenou barvou převlečná matice, červenou barvou těsnění, žlutou barvou příruba a oranžovou barvou adaptér vstřikovačů.



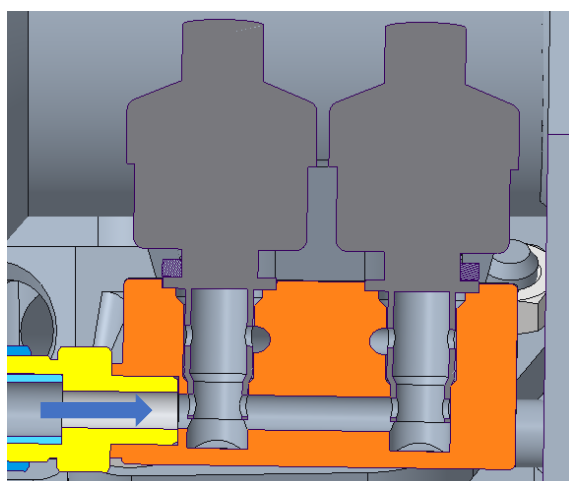
Obr. 21 - Řez sestavou sání motoru

Do sání je vložena příruba, ta je zajištěna převlečnou maticí. Spoj je utěsněn okroužkem. Příruba vyústíje přibližně doprostřed průřezu sání, aby docházelo k co nejlepšímu promíchání paliva a vzduchu. Je zde také co nejtenčí, aby co nejméně omezovala průtočnou plochu sání. Pokud by vyústovala hned u stěny sání, hrozilo by vytvoření laminární vrstvy vstřikovaného vodíku, což by mělo za následek nehomogenní směs. Na druhém konci je příruba spojena šrouby s adaptérem vstřikovačů. Ve spoji je vloženo těsnění.

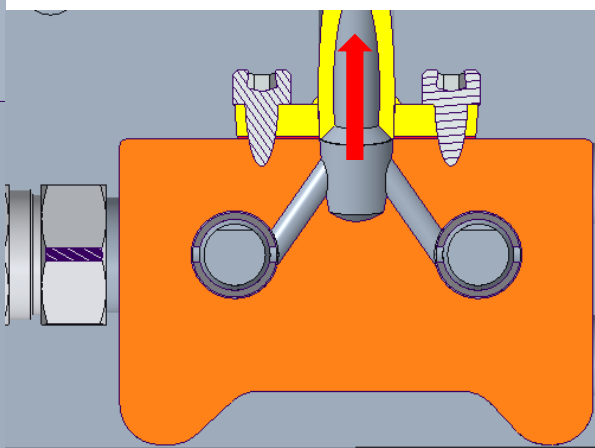


Obr. 22 - Adaptér vstřikovačů

Na obr. 22 je zobrazen adaptér vstřikovačů, modrou šipkou je naznačen přívod vodíku do adaptéru (input) a červenou šipkou výstup (output). Do horních děr jsou vloženy vstřikovače. Na obr. 23 je řez adaptérem se vstřikovači. Z šroubení na levé straně je přiváděn vodík do vstřikovačů. Na obr. 24 je naznačen výstup vodíku ze vstřikovačů.



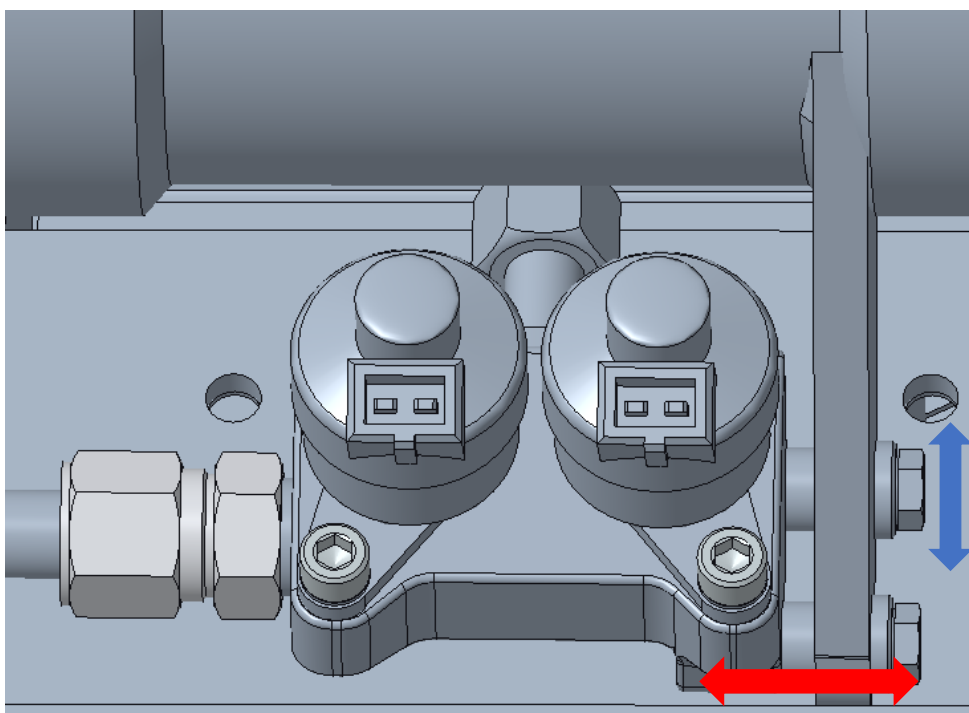
Obr. 23 - Řez Svislý



Obr. 24 - Řez vodorovný



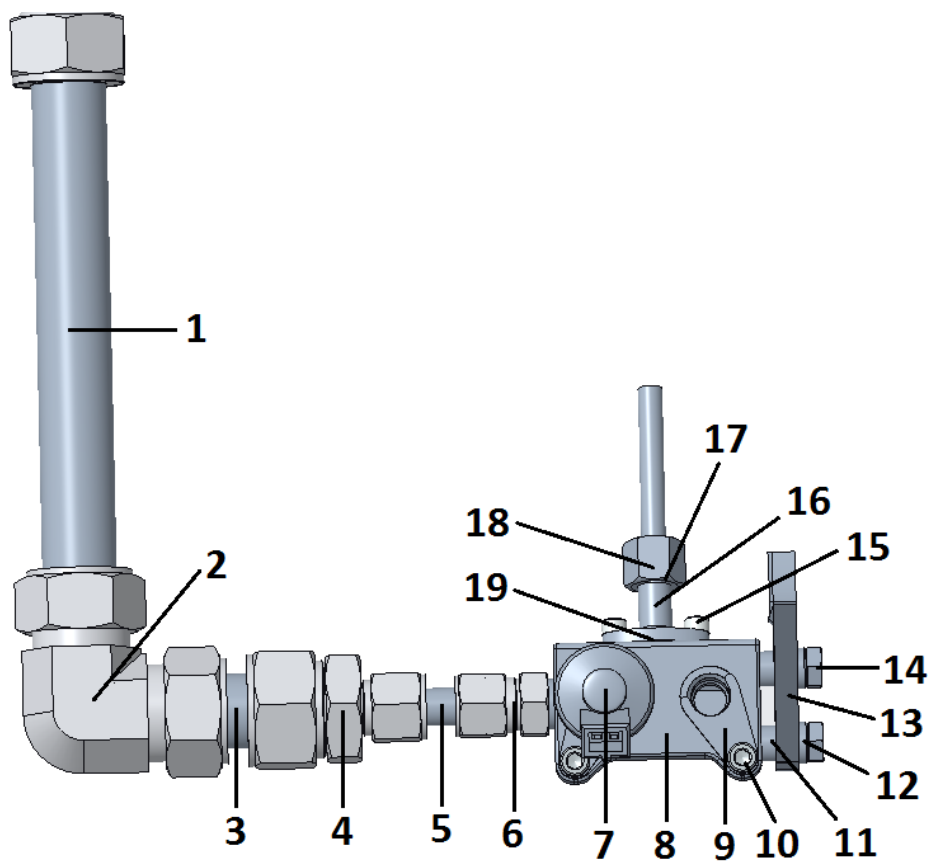
Při chodu jednoválcového motoru vznikají značné vibrace, které by mohly mít za následek rozlomení příruby držící adaptér vstřikovačů. Proto je k sání navíc přivařeno žebro, ke kterému je adaptér připevněn dvěma šrouby. Poněvadž metoda přivařování žebra k sání není příliš přesná (může dojít k deformaci žebra teplem), je zde nutnost vyrovnání případných odchylek mezi adaptérem a žebrem (viz obr. 25). Toho je docíleno skrze distanční kroužky pro axiální úchyly (červená šipka) a pro radiální úchyly (modrá šipka) je průměr díry pro šroub podstatně větší než jmenovitý průměr šroubu.



Obr. 25 - Spojení výztužného žebra s adaptérem



Na obr. 26 a 27 je palivový systém a jeho kusovník.



Obr. 26 - Palivový systém



1	2	3	4				
A			A				
B			B				
1	TRUBKA	ČSN 42 5715-TR ø25x2,6-200	17 240 1				
2	ŠROUBENÍ KOLÍNKO	SWAGELOK S-1610-9	316SS 1				
3	TRUBKA	ČSN 42 5715-TR ø25x2,6-100	17 240 1				
4	ŠROUBENÍ PŘECHODNÉ	SWAGELOK SS-1610-6-8	316SS 1				
5	TRUBKA	ČSN 42 5715-TR ø15x2,4-100	17 240 1				
6	ŠROUBENÍ	SWAGELOK SS-11610-1-OR	316SS 1				
C	7	VSTŘIKOVAČ	CAP SP-014	2			
8	ADAPTÉR		TYČ PLOCHÁ ČSN 42 5522-40x50x75	ADAPTÉR	17 240	1	
9	DRŽÁK VSTŘIKOVAČE		ČSN 42 5301-P2-20x60	DRŽÁK VSTŘIKOVAČE	11 500	2	
10	ŠROUB S VÁLCOVOU HLAVOU S VNITŘNÍM ŠESTIHRANEM	ISO 4762 - M6 x 16 - 10.9				2	
11	DISTANČNÍ KROUŽEK		TYČ KRUHOVÁ ČSN 42 5551-ø15-10	DISTANČNÍ KROUŽEK	11 500	2	
D	12	PODLOŽKA	TYČ KRUHOVÁ ČSN 42 5551-ø15-10	PODLOŽKA	11 500	2	
13	ŽEBRO		TYČ PLOCHÁ ČSN 42 5522-50x8x120	ŽEBRO	11 500	1	
14	ŠROUB SE ŠESTIHRANNOU HLAVOU	ISO 4017 - M8 x 25 - 10.9				2	
15	ŠROUB S VÁLCOVOU HLAVOU S VNITŘNÍM ŠESTIHRANEM	ISO 4762 - M5 x 12 - 10.9				2	
16	PŘÍRUBA		TYČ KRUHOVÁ ČSN 42 5551-ø15-10	PŘÍRUBA	17 240	1	
E	17	O-KROUŽEK	DIN 3771 - 8,5 x 2			1	
18	PŘEVLEČNÁ MATICE	DIN 3870 - M16				1	
19	TĚSNĚNÍ	FLUOLION 200	40 x 15		PTFE	1	
POZ	NÁZEV	NORMA	ROZMĚR	Č. VÝKRESU	MATERIÁL	KS	
KUSOVNÍK							
	Autor	Datum	Podpis	Datum	HMOTNOST	MĚŘITKO	
NAVRHL	Tadeáš Čížek		PŘEZK.		SESTAVA		
KRESLIL	Tadeáš Čížek		SCHVÁLIL		KUSOVNÍK	PROMÍTÁNÍ: (ISO E)	
F	ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ <small>v5.0</small>		NÁZEV NÁVRHOVÝ VÝKRES ČÍSLO VÝKRESU				TYP:
						LIST: 2 /	

Obr. 27 - Kusovník

Jednotlivé výkresy budou na základě domluvy s vedoucím práce zhotoveny v dalším projektu. 3D model a veškeré přílohy byly s ohledem na spolupráci s komerčními partnery předány vedoucímu práce.



9 Závěr

V této práci byla provedena literární rešerše použití vodíku ve spalovacích motorech. Na základě těchto poznatků byl vybrán vhodný systém přípravy směsi pro experimentální motor, vybráno bylo nepřímé vstřikování vodíku do sání. Dále byl stanoven požadovaný hmotnostní průtok paliva vstřikovací soustavou $\dot{m}_{H_2} = 4,140 \text{ g/s}$ s důrazem na požadovanou vnější charakteristiku motoru, na základě předchozích studií byla uvažována tepelná účinnost motoru 40 %. Z dostupných vstřikovačů byla vybrána vhodná varianta, která byla následně aplikována v návrhu palivové soustavy motoru, jedná se o dvojici vstřikovačů SP-014 od společnosti CAP. Před výsledným návrhem bylo ještě nutno doplnit 3D dokumentaci motoru o chybějící prvky, kterými bylo sání motoru a podpůrná konstrukce chladicího systému. Výsledkem práce byl 3D model návrhu palivové soustavy motoru a výpočetní software požadovaného průtoku paliva.

Z časových důvodů nebylo možné projekt realizovat na skutečném experimentálním motoru. Ale očekává se dosažení požadovaného točivého momentu 260 Nm v nižších otáčkách a požadovaného výkonu 40 kW ve vyšších otáčkách motoru. Emise NOx by měly být minimalizovány spalováním velmi chudé směsi ($\lambda = 1,8$ až $2,2$).

V návaznosti na tuto práci bude vhodné vytvořit CFD simulaci přípravy palivové směsi. Na základě této simulace lze dále optimalizovat geometrii vstřikovací soustavy a strategii řízení motoru (parametry vstřiku).



10 Bibliografie

- [1] KLELL, Manfred; EICHLSEDER, Helmut; TRATTNER, Alexander. *Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. ISBN 3658204478.
- [2] ROSEN, Marc. *Thermodynamic comparison of hydrogen production processes*. In: International Journal of Hydrogen Energy, Ryerson Polytechnic University, Toronto, Canada. May 1996. ISSN 0360-3199.
- [3] Ministerstvo průmyslu a obchodu. Vodíková strategie České republiky [online]. [cit. 23.6.2022] Dostupné z: https://www.mpo.cz/assets/cz/rozcestnik/pro-media/tiskove-zpravy/2021/7/3VL-03-Vodikova-strategie_v030b.pdf
- [4] Ekolist. Plyn budoucnosti. Jak daleko je Česko na cestě k jeho využití? [online]. [cit. 23.6.2022] Dostupné z: <https://ekolist.cz/cz/zpravodajstvi/zpravy/vodik-v-cesku-jak-daleko-jsme-na-cestech-k-vyuziti-plynu-budoucnosti>
- [5] LARSEN, Hans; FEIDENHANSI, Robert; SONDERBERG, Leif. *Risoe Energy Report 3 - Hydrogen and its competitors*. Risoe National Laboratory, Denmark. 2004. Dostupné z: https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/7711411/ris_r_1469.pdf
- [6] Eckert Composite Solution. Hydrogen [online]. [cit. 24.6.2022] Dostupné z: <https://ecs-composite.com/hydrogen?lang=en>
- [7] BOSSEL, Ulf; ELIASSON, Baldur; TAYLOR, Gordon. *The future of the hydrogen economy: Bright or Bleak?*. 2003 Fuel Cell Seminar, April 2003. Dostupné z: <https://planetforlife.com/pdffiles/h2report.pdf>
- [8] ZUTTEL, Andreas. *Hydrogen storage methods*. Naturwissenschaften 91, 2004, p. 157-172. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00114-004-0516x>
- [9] Royal Belgian Academy Council of Applied Science (BACAS). Hydrogen as an energy carrier. 2006. Dostupné z: https://kvab.be/sites/default/rest/blobs/1125/tw_BACAS_hydrogen_as_an_energy_carrier.pdf
- [10] Airbus. How to store liquid hydrogen for zero-emission flight [online]. [cit. 25.6.2022] Dostupné z: <https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2021-12-how-to-store-liquid-hydrogen-for-zero-emission-flight>
- [11] YOUNG, R. ET AL. *A Hydrogen ICE Vehicle Powered by Ovonic Metal Hydride Storage*. SAE International World Congress, Detroit, Michigan, USA. 2004. ISSN 0148-7191.
- [12] ACEVES, S.M. ET AL. *High-density automotive hydrogen storage with cryogenic capable pressure vessels*. Intl J Hydrogen Energy, 35 (3). 2010. pp. 1219 - 1226



- [13] AHLUWALIA, R.K. ET AL. *Technical assessment of cryo-compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications*. International Journal of Hydrogen Energy. 35 (9). 2010. pp. 4171-4184. ISSN 0360-3199
- [14] MACEK, Jan. *Spalovací motory*. 2. vyd. České vysoké učení technické, Praha. 2012. ISBN 978-80-01-05015-6.
- [15] TAKÁTS, Michal. *Příslušenství plynových motorů*. České vysoké učení technické, Praha. 1996. ISBN 80-01-010589
- [16] NORBECK, J.M.; ET AL. *Hydrogen Fuel for Surface Transportation*. Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA, USA. 1996. ISBN 1560916842.
- [17] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill, New York, USA. 1988. ISBN 007028637X.
- [18] SOBOTOVÁ, Jana ET AL. *Nauka o materiálu I. a II.* České vysoké učení technické, Praha. 2018. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [19] HUYSKENS, P.; VAN OOST, S.; GOEMAERE, P.J.; BERTELS, K. The technical implementation of a retrofit hydrogen PFI system on a passenger car. Karel de Grote University College. 2011. SAE paper 2011-01-2004.
- [20] SEBOLT, D.; MANSBART, M.; GRABNER, P. ET AL. *Hydrogen Engines for Future Passenger Cars and Light Commercial Vehicles*. MTZ Worldw 82. February 2021. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s38313-020-0603-1#Tab1>
- [21] KYJOVSKÝ, Štěpán. *Fuel system for a gas engine with a scavenged prechamber*. Praha, 2021. ČVUT v Praze. Fakulta strojní. Vedoucí práce Ing. Jiří Vávra, Ph.D.
- [22] VÁVRA, Jiří; SYROVÁTKA, Zbyněk; TAKÁTS, Michal. *Use of Hydrogen in a Combustion Engine with an Advanced Combustion*. Fisita 2021, ČVUT, Praha. 2021. Dostupné z: <https://doi.org/10.46720/F2021-CAF-034>
- [23] YIP, HL; SRNA, A; YUEN, ACY; KOOK, S; TAYLOR, RA; YEOH, GH. *A Review of Hydrogen Direct Injection for Internal Combustion Engines: Towards Carbon-Free Combustion*. Applied Sciences. 2019. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/22/4842/htm>
- [24] Torque. What is direct injection? [online]. [cit. 28.6.2022] Dostupné z: <https://www.torque.com.sg/features/what-is-direct-injection/>
- [25] FERENC, Bohumil. *Spalovací motory - Karburátory a vstřikování paliva*. 1. vydání, Computer press, Praha 4. 2004. ISBN 80-251-0207-6.
- [26] NORBECK, Joseph; BARTH, Matthew; FARREL, Jay; HEFFEL, James. *Development and Evaluation of a Hydrogen Fuel Power Plant for a Hybrid Electric Vehicle - Phase II*. University of California, Riverside. 1997. Dostupné z: <https://www.researchgate>



- .net/publication/242534708_Development_and_Evaluation_of_a_Hydrogen_Fuel_Power_Plant_for_a_Hybrid_Electric_Vehicle_-_Phase_II
- [27] BARKHIMER, R.; WONG, H. *Application of Digital, Pulse-Width-Modulated Sonic Flow Injectors for Gaseous Fuels*. Warrendale, PA, USA. 1995. SAE Paper 951912.
- [28] Bosch. Injector for CNG systems [online]. [cit. 4.7.2022] Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/valves/cng-injector/>
- [29] Průtržné membrány COMAT: PROGROUP ENGINEERING s.r.o. [online]. [cit. 6.7.2022] Dostupné z: <http://progroup.cz/pojistky/>
- [30] Swagelok. Skill: Swagelok tube fitting assembly [online]. [cit. 6.7.2022] Dostupné z: <https://northerncal.swagelok.com/blog/bid/88199/skill-tube-fitting-assembly-one-inch-and-under>

11 Seznam obrázků

Obr. 1 - Kompozitní nádrž stlačeného vodíku [6].....	11
Obr. 2 - Nádrž na zkapalněný vodík [10]	12
Obr. 3 - Konvertovaný motor Opel Combo [19].....	16
Obr. 4 - Schéma motoru TU gratz [20]	18
Obr. 5 - Schéma měřicího stanoviště motoru ČVUT [22]	20
Obr. 6 - Přímé vstřikování [24]	21
Obr. 7 - Nepřímé vstřikování [24].....	22
Obr. 8 - Náhled programu v Excelu	27
Obr. 9 - Schéma vstřikovače řady SP [27].....	28
Obr. 10 - Vstřikovač CAP řady SP.....	29
Obr. 11 - Vstřikovač Bosch NG12 [28]	30
Obr. 12 - Model experimentálního motru.....	31
Obr. 13 - Model sání	31
Obr. 14 - Model sání v řezu	31
Obr. 15 - Model motoru s konstrukcí	32
Obr. 16 - Řez celkové sestavy	32
Obr. 17 - Průtržná membrána	33
Obr. 18 - Odklon přetlaku.....	33
Obr. 19 - Schéma funkce a instalace šroubení Swagelok [30].....	34



Obr. 20 - Sestava motoru s přívodem paliva	34
Obr. 21 - Řez sestavou sání motoru	35
Obr. 22 - Adaptér vstřikovačů	36
Obr. 23 - Řez svislý.....	36
Obr. 24 - Řez vodorovný	36
Obr. 25 - Spojení výztužného žebra s adaptérem	37
Obr. 26 - Palivový systém	38
Obr. 27 - Kusovník.....	39

12 Seznam grafů

Graf. 1 - Zdroje vodíku [1].....	10
Graf. 2 - Závislost výkonu na otáčkách [19].....	17
Graf. 3 - Závislost NO _x na lambda [19].....	17
Graf. 4 - Lambda, účinnost a emise NO _x v závislosti na otáčkách (Twin PFI) [20]	18
Graf. 5 - Lambda, účinnost a emise NO _x v závislosti na otáčkách (DI) [20]	19
Graf. 6 - Závislost momentu a výkonu na otáčkách motoru	23
Graf. 7 - Závislost středního efektivního tlaku na otáčkách motoru.....	23
Graf. 8 - Závislost NO _x na lambda [22].....	24

13 Seznam tabulek

Tab. 1 - Vlastnosti některých plynných paliv [15].....	14
Tab. 2 - Parametry motoru [19].....	16
Tab. 3 - Porovnání parametrů motorů [22].....	24



14 Seznam zkratek a symbolů

Označení	Jednotka	Význam
CNG		stlačený zemní plyn
LPG		zkapalněný ropný plyn
PFI		Port fuel injection = nepřímé vstřikování
DI		Direct injection = přímé vstřikování
λ	[-]	Lambda = součinitel přebytku vzduchu
BMEP	[bar]	Break mean effective pressure = střední efektivní tlak
A/F	[-]	Air/Fuel ratio = poměr vzduchu a paliva
M_{H_2}	[g/mol]	molární hmotnost molekuly vodíku
mol_{N_2}	[-]	počet molů dusíku
P_p	[W]	příkon
P_v	[W]	výkon
P_{abs}	[-]	násobek tlaku přeplňování
η	[-]	tepelná účinnost
\dot{m}_{H_2}	[g/s]	hmotnostní tok vodíku
t^*	[s]	doba vstřiku
$m_{H_2}^*$	[g]	hmotnost vodíku na jeden vstřik
V_z	[l]	zdvihový objem
ρ_{H_2}	[kg/m ³]	hustota vodíku
N_{H_2}	[-]	část objemu válce zabíraná vodíkem
n	[ot./min]	otáčky za minutu
K	[-]	konstanta ventilu
ρ_1	[kg/m ³]	hustota paliva na vstupu
γ	[-]	poissonova konstanta
P_1	[kPa]	absolutní tlak na vstupu
P_2	[kPa]	absolutní tlak na výstupu
\dot{m}_g	[g/s]	hmotnostní průtok SP-14
\dot{m}_b	[g/s]	hmotnostní průtok NG12
H_{uH_2}	[MJ/kg]	výhřevnost vodíku