FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Konverze vznětového motoru na vodíkový zážehový motor

Conversion of a diesel engine to a hydrogen spark-ignition engine

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
2022

David ČERVINKA

Studijní program:	N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Vedoucí práce:	Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Červinka** Jméno: **David** Osobní číslo: **491278**

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:

Konverze vznětového motoru na vodíkový zážehový motor

Název bakalářské práce anglicky:

Conversion of a diesel engine to a hydrogen spark-ignition engine

Pokyny pro vypracování:

Proveďte úpravu hlavy válce vznětového zkušebního jednoválcového motoru tak, aby se dal motor provozovat na plynná paliva. Původní vstřikovač nahraďte vhodnou zapalovací svíčkou. Proveďte veškeré nutné úpravy potřebné pro požadovaný provoz motoru. Prozkoumejte nutnost změny materiálu ventilových sedel, atd. Navrhněte úpravy víka hlavy válce pro připojení vysokonapěťového kabelu. Připravte snímání polohy vačkového a klikového hřídele pro řízení zapalování a instalaci tlakových snímačů pro tří-tlakovou analýzu.

Seznam doporučené literatury:

Výkresová dokumentace, 3D CAD modely.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zbyněk Syrovátka, 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: **06.06.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	doc. Ing. Oldřich Vítek, 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

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Anotační záznam

Jméno autora:	David Červinka
Název práce:	Konverze vznětového motoru na vodíkový zážehový motor
Anglický název:	Conversion of a diesel engine to a hydrogen spark-ignition engine
Rozsah práce:	
	60 stran
	25 obrázků
	2 tabulky
	23 příloh
Akademický rok:	2021/2022
Ústav:	12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Studijní program:	Teoretický základ strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Zbyněk Syrovátka, Ph.D.
Klíčová slova:	Spalování vodíku, zážehový motor, přestavba motoru, zapalovací systém
Key words:	Hydrogen combustion, spark-ingnition engine, engine conversion, ingnition system

Abstrakt

Smyslem této práce je návrh přestavby vznětového motoru na zážehový motor spalující vodík. Úvodní část práce se věnuje otázce ekologie výroby a spalování vodíku. Samotný návrh je prováděn v programu PTC Creo 4.0 na 3D modelu motoru dodaného výrobcem. Kromě úprav motoru je v práci řešena instalace zapalovacího systému a umístění nezbytných snímačů pro jeho funkci. V závěru práce jsou detailně popsány úpravy jednotlivých komponent.

Abstract

The point of this bachelor thesis is desing of hydrogen internal combustion engine. In the beginning, the focus is on ecological aspects of hydrogen production and combustion. The desing itself is made with PTC Creo 4.0 software on 3D engine model provided by manufacturer. Apart from engine modification, ingnition system with necessary components was drafted. Final part of the thesis provides a detailed look on desing of particular components.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: “Konverze vznětového motoru na vodíkový zážehový motor“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

V Praze dne:

……

(podpis autora)

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Zbyňku Syrovátkovi, Ph.D. za konzultace a cenné rady. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

Obsah

Seznam použitých zkratek 8
Úvod 10
1 Budoucnost vodíku jako alternativního paliva 11
2 Tvorba emisí při spalování vodíku 12
3 Výroba vodíku 14
3.1 Elektrolýza vody 14
3.2 Parní reforming zemního plynu 15
3.3 Zplyňování pevných paliv 16
3.4 Parciální oxidace 16
4 Popis motoru vybraného pro přestavbu 17
5 Pracovní fáze čtyřdobého spalovacího motoru 18
6 Spalování vodíku v pístových motorech 19
7 Návrh přestavby experimentálního motoru TATRA 22
8 Ověření realizovatelnosti úpravy spalovacího motoru 23
9 Umístění zapalovací svíčky 24
10 Zapalovací kabel 25
11 Vedení zapalovacího kabelu 26
12 Víko hlavy válce 27
13 Materiál ventilových sedel 28
13.1 Výměna ventilových sedel 29
13.2 Montáž ventilových sedel 30
14 Systém zapalování 30
14.1 Zapalovací kabel 31
14.2 Řídící jednotka 31
14.3 Zapalovací svíčka 31
15 Snímače polohy a otáček 34
15.1 Hallův snímač 34
15.2 Indukční snímač 35
15.3 Optoelektronický snímač 35
16 Umístění snímačů zapalování 36
16.1 Snímač otáček klikové hřídele 36
16.2 Snímač polohy vačkové hřídele 36
17 Umístění snímačů pro třítlakovou analýzu (TPA) 37
17.1 Snímač tlaku nasávaného vzduchu 37
17.2 Snímač tlaku ve spalovacím prostoru 37
17.3 Snímač tlaku výfukových plynů 38
18 Pevnostní analýza 38
18.1 Vstupní hodnoty pevnostní analýzy 38
18.1.1 Výpočet síly od hlavových šroubů 38
18.1.2 Výpočet osové síly 39
18.1.3 Výpočet tlaku ve ventilových sedlech 39
18.1.4 Dosedací tlaky 40
18.1.5 Nalisovaný spoj 41

19 Vyhodnocení výsledků pevnostní analýzy *43*
Závěr *46*
Seznam tabulek *52*
Seznam příloh *53*

Seznam použitých zkratek

Veličina	Jednotka	Význam
α_s	[°]	Úhel dosedací plochy sacího ventilu
α_v	[°]	Úhel dosedací plochy výfukového ventilu
CO	[-]	Oxid uhelnatý - produkt nedokonalého spalování fosilních paliv
$\mathrm{CO_2}$	[-]	Oxid uhličitý - produkt nedokonalého spalování fosilních paliv, skleníkový plyn
$\mathrm{CH_4}$	[-]	Metan
CNG	[-]	Compressed Natural Gas – stlačený zemní plyn, alternativní palivo pro spalovací motory
$\mathrm{d_2}$	[mm]	Střední průměr závitu šroubu
$\mathrm{d_s}$	[mm]	Střední průměr styčné plochy šroub – hlava válce
Euro (IV, V, VI)	[-]	Norma Evropské unie stanovující limitní hodnoty škodlivin ve výfukových plynech benzinových a naftových motorů
E^H	[MPa]	Modul pružnosti materiálu ventilových sedel (ocel)
E^N	[MPa]	Modul pružnosti materiálu hlavy válců (hliník)
f	[-]	Součinitel smykového tření
F_O	[N]	Osová síla ve šroubovém spoji
F_{as}	[N]	Axiální síla do uložení sedla sacího ventilu
F_{av}	[N]	Axiální síla do uložení sedla výfukového ventilu
F_{rs}	[N]	Radiální síla do uložení sedla sacího ventilu
F_{rv}	[N]	Radiální síla do uložení sedla výfukového ventilu
φ'	[°]	Redukovaný třecí úhel
γ	[°]	Úhel stoupání závitu
$\mathrm{H_2}$	[-]	Vodík
K^H	[MPa]	Lisovací konstanta sedla ventilů
K^N	[MPa]	Lisovací konstanta hlavy válců
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu lambda

LPG	[-]	Liquified Petroleum Gas - zkapalněný ropný plyn, alternativní palivo pro spalovací motory
M_M	[N · mm]	Moment vytvořený třením pod hlavou šroubu
M_Z	[N · mm]	Moment vytvořený třením v závitu
M_k	[N · mm]	Utahovací moment na klíči
NO_x	[-]	Oxidy dusíku - plyny tvořící emise spalovacích motorů
ν^H	[-]	Poissonova konstanta materiálu ventilových sedel (ocel)
ν^N	[-]	Poissonova konstanta materiálu hlavy válců (hliník)
p_{2S}	[MPa]	Tlak v lisovaném spoji sacího sedla
p_{2V}	[MPa]	Tlak v lisovaném spoji výfukového sedla
p_s	[Pa]	Maximální tlak ve spalovacím prostoru
P	[mm]	Stoupání závitu
ppm	[-]	Parts per milion - počet částic v jednom milionu celku
Δr	[mm]	Lisovací přesah sedel ventilů
$Rp_{0,2}$	[N · mm^{-2}]]	Smluvní mez kluzu
SCR	[-]	Technologie umožňující snížit emise NOx
S_s	[mm^2]	Plocha talíře sacího ventilu
S_{sa}	[mm^2]	Plocha uložení sacího sedla v hlavě válců v axiálním směru
S_{sr}	[mm^2]	Plocha uložení sacího sedla v hlavě válců v radiálním směru
S_v	[mm^2]	Plocha talíře výfukového ventilu
S_{va}	[mm^2]	Plocha uložení výfukového sedla v hlavě válců v axiálním směru
S_{vr}	[mm^2]	Plocha uložení výfukového sedla v hlavě válců v radiálním směru
σ_{max-p}	[N · mm^{-2}]	Maximální napětí v kritickém místě před úpravou
σ_{max-u}	[N · mm^{-2}]	Maximální napětí v kritickém místě po úpravě
TPA	[-]	Three pressure analysis - třítlaková analýza
V12	[-]	Vidlicový dvanáctiválcový motor

Úvod

Aktuálním trendem vývoje automobilového průmyslu je snaha o snižování emisí produkovaných automobily. Zvyšující se požadavky začínají postupně omezovat spalovací motory, které již nejsou schopné plnit navrhované limity. Většina automobilek se začíná přeorientovávat na elektromobily. Příchod elektromobilů však s sebou přináší mnoho úskalí, zejména potřebu vybudování nabíjecích stanic spojenou s vyššími požadavky na elektrickou distribuční soustavu.

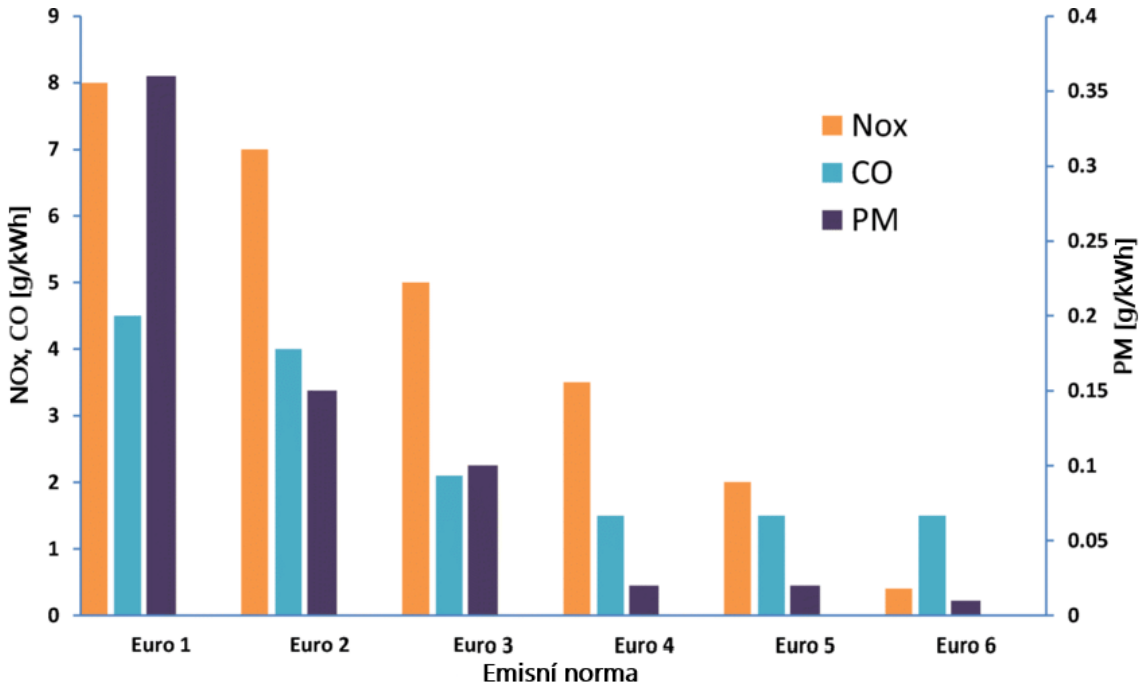
V některých případech není provoz elektromobilů přínosný z hlediska snižování emisí, a to z důvodů neekologické výroby elektrické energie (např. vysoký podíl uhelných elektráren). Stejné otázky je potřeba klást i při zvažování vodíkových pohonů. Je z hlediska ekologie velký rozdíl, zdali spalujeme vodík získaný z fosilních paliv nebo vodík vyrobený elektrolýzou vody za použití elektřiny z obnovitelných zdrojů [1].

Pokud přejdeme problematiku výroby vodíku a zaměříme se na přínosy, které nám přináší jeho spalování ve srovnání s konvenčními palivy, je podstatné snížení výfukových emisí. Pokud nedochází k uniku motorového oleje do spalovacího prostotu, tak nevznikají oxidy uhlíku. Oxidy dusíků lze omezit spalováním chudé směsi.

Snížení emisí spalovacího motoru je hlavním důvodem jeho přestavby a smyslem této práce. Tím vzniká příležitost z hlediska prodloužení života spalovacích motorů a plnění emisních norem. Pro samotné výrobce automobilů by použití vodíkových motorů mohlo být i ekonomickým přínosem. Na rozdíl od kompletního přechodu na výrobu elektromobilů by se pouze upravily již produkované motory na spalování vodíku.

1 Budoucnost vodíku jako alternativního paliva

Při spalování fosilních paliv dochází k uvolňování škodlivých látek do ovzduší. V případě motorových vozidel tyto látky označujeme souhrnně jako výfukové plyny. Jejich množství je během provozu vozidla sledováno a omezováno emisními normami. V Evropské unii jsou pro nově vyráběné automobily závazné emisní normy Euro, které sledují zejména hodnoty oxidu uhelnatého (CO), oxidů dusíku (NO_x) a pevných částic (PM) [2].



Obr. 1 - Vývoj emisních norem Euro [2]

Emisní normy jsou s postupem času stále přísnější (Obr.1) a přestávají být pro běžné spalovací motory splnitelné. Z toho důvodu dochází k postupnému ukončování jejich vývoje a většina světových automobilek se začíná přeorientovávat na výrobu elektromobilů.

Z podstaty elektromobilů plyne řada požadavků na změnu infrastruktury dopravy – zejména stavbu dobíjecích stanic ve městech. Největší překážkou rychlého nárůstu množství dobíjecích stanic je nedostatečná kapacita elektrické sítě. I kdybychom přeměnili všechny čerpací stanice na dobíjecí, i tak by byl jejich počet nedostatečný. Důvodem je mnohem delší doba dobíjení elektromobilů v porovnání s dobou tankování palivové nádrže [3]. Tato nepříjemná vlastnost by se projevila zejména na dálnicích, kde s rychlostí stoupá energetická náročnost pohonu.

U pohonu vozidel energií z palivového článku nebo přímo spalujících vodík se tyto nevýhody neobjevují, nádrž je možné doplnit v řádu minut. Nevýhodou jsou nezanedbatelné energetické ztráty při kompresi plynu pro vysokotlaké nádrže ve vozidle [4].

Budoucnost pohonů vozidel není v současnosti příliš jasná. V každém případě dochází ke zvyšování podílu elektromobilů. Ukončení výroby spalovacích motorů je předpokládáno v roce 2030, kdy už nebudou schopné plnit další emisní limity. V současné době je však tato představa považována za nereálnou [5]. Jedním z možných dočasných řešení se zabývá tato práce. Spalováním vodíku přímo v pístových motorech se podstatně snižují emise. To prodlouží život spalovacích motorů a umožní plynulý přechod na alternativní pohony.

2 Tvorba emisí při spalování vodíku

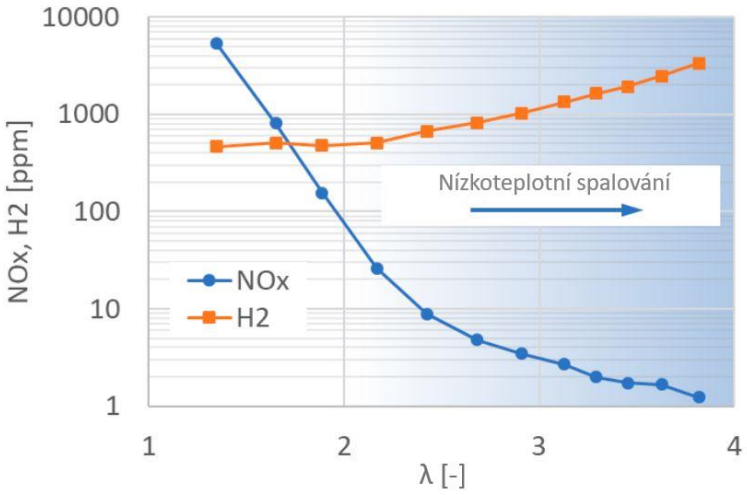
Spalování vodíku s kyslíkem probíhá podle rovnice:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O \tag{10}$$

Za těchto předpokladů by docházelo pouze ke vzniku vodní páry. V atmosféře jsou ale zastoupeny i ostatní plyny kromě kyslíku. Největší podíl tvoří dusík N_2 a to se projevuje i na emisích vodíkového spalovacího motoru [6]. Spalování poté probíhá podle následující rovnice:

$$2H_2 + O_2 + N_2 \rightarrow H_2O + N_2 + NO_x \tag{11}$$

Při spalování vodíku se vzduchem tedy dochází ke vzniku oxidů dusíku (11), což je jeden z parametrů sledovaných v emisních normách EURO [7]. Další sledovaný údaj, hodnoty CO_2 jsou při porovnání s konvenčními palivy výrazně nižší. V rámci experimentu prováděném na přeplňovaném motoru ŠKODA došlo ke snížení emisí CO_2 o 97,6 až 99,5 % oproti dnes vyráběným vznětovým motorům [8].

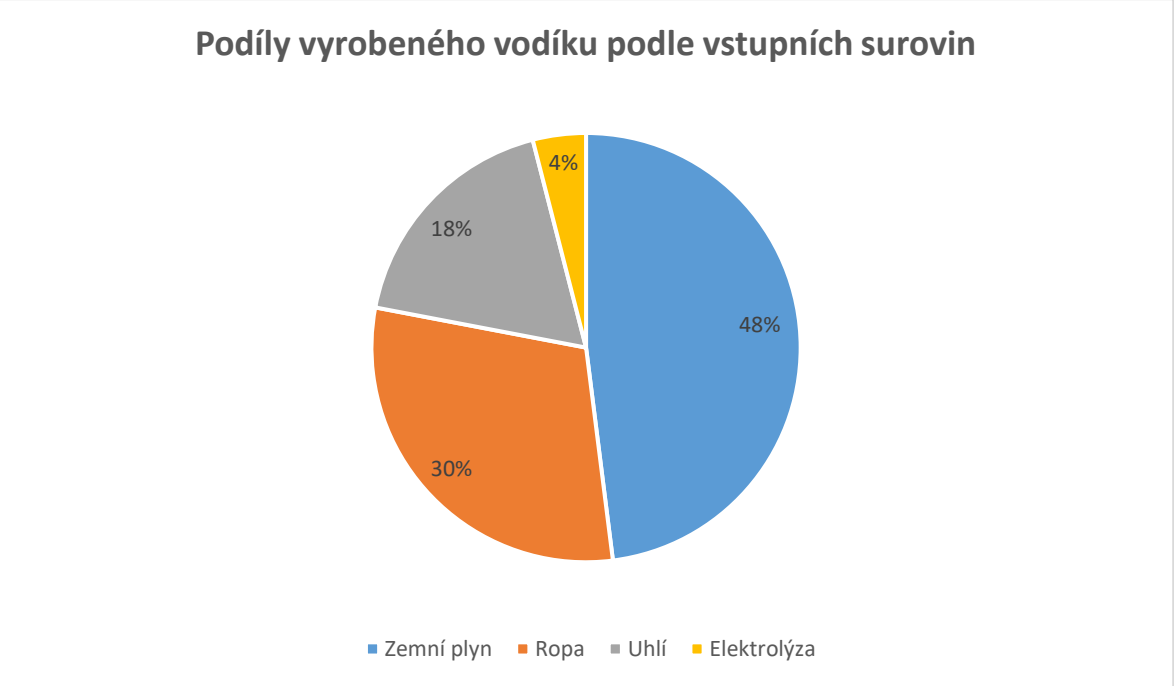


Obr. 2 - Pokles emisí NOx. [8]

Problematické zůstávají hodnoty NOx. Pro jejich snížení jsou u běžných spalovacích motorů využívány systémy zpracování výfukových plynů (SCR, EGR), které jsou aplikovatelné i pro vodíkové motory. Dalším možným řešením je spalování chudé směsi, čímž dochází k výraznému snížení množství produkovaných oxidů dusíku (Obr.5). Vznik NOx je závislý na teplotě spalování (jedná se o endotermní reakci). Snížením množství paliva ve směsi snížíme teplotu spalování a tím i produkci NOx [9].

3 Výroba vodíku

Samotné výhody vodíku z hlediska ekologie jsou velmi závislé na způsobu jeho výroby. Pokud vyrábíme většinu vodíku z ropy a zemního plynu (Graf 1), nelze považovat toto řešení za přínosné. Situace se obrací například při výrobě vodíku elektrolýzou vody, pokud bychom použili obnovitelné zdroje elektrické energie. Snížení emisí spalovacího motoru je hlavním důvodem jeho přestavby a smyslem této práce.



Graf 1 – Rozložení surovin pro výrobu vodíku [10]

3.1 Elektrolýza vody

Při elektrolýze vody dochází k rozkladu na vodík a kyslík. Zařízení ve kterém reakce probíhá – elektrolyzér, se skládá z nádoby naplněné elektrolytem a do něj ponořených elektrod. Podstatou děje je přechod elektronů z elektrolytu (vody) na elektrodu připojenou ke kladnému pólu zdroje (anodu). Zde dochází k oxidaci a vzniku kyslíku (1). Naopak ze záporného pólu zdroje jsou dodávány elektrony do elektrody (katody) a dochází k redukci a vzniku vodíku (2) [11].

Katoda:

$$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^- \qquad (1)$$

Anoda:

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^- \quad (2)$$

Mezi výhody patří jednoduchost a možnost využití obnovitelných zdrojů pro napájení elektrolyzéru. Pomocí této metody je produkováno pouze několik procent z celkového množství vodíku, jelikož její výhodnost je velmi závislá na cenách elektrické energie [12]. Elektrolýza vody dosahuje velmi vysokého stupně čistoty vodíku, což ale není pro jeho spalování v pístových motorech podstatné, narozdíl od použití pro palivové články [13].

3.2 Parní reforming zemního plynu

Pro parní reforming je využíván metan CH_4, hlavní složka zemního plynu. V současnosti se jedná o nejrozšířenější metodu výroby vodíku z důvodu nízkých nákladů. Při výrobě dochází k reakci zemního plynu s vodní parou za vzniku vodíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého v trubkovém katalytickém reaktoru dle rovnic:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \quad (3)$$

$$CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2 \quad (4)$$

Protože se jedná o endotermní reakci, teplota v reaktoru dosahuje 800 °C a tlak se pohybuje mezi 3-5 MPa. Zemní plyn je před vstupem zbaven sirných nečistot a ohřátý na teplotu kolem 400 °C. [14]

V další fázi procesu (5) dochází k přeměně oxidu uhelnatého na vodík a oxid uhličitý.

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad (5)$$

Touto reakcí vytěžíme další množství vodíku. Na závěr dochází k čistění a separaci vodíku a tím dosahujeme čistoty 98 % objemu [14].

3.3 Zplyňování pevných paliv

Tato metoda byla hojně využívána v první polovině dvacátého století. Jako palivo se využívá černé uhlí, hnědé uhlí a koks.

$$C + H_2O \leftrightarrow CO + H_2 \tag{6}$$

Za vysokých teplot a přísunu kyslíku reaguje uhlík s vodní parou (6). Výsledkem jsou dva plyny a to oxid uhelnatý a vodík [12].

3.4 Parciální oxidace

Pro výrobu vodíku parciální oxidací lze využít suroviny vznikajících při zpracování ropy. Nejčastěji se používají těžké ropné frakce. Principem je rozprašování předehřáté ropné frakce z hořáků do proudu kyslíku a vodní páry. Reakce (7) a (8) probíhá při teplotách 1300 až 1500 °C a tlaku 3 až 8 MPa [14].

$$2\ C_nH_m + nO_2 \leftrightarrow 2nCO + mH_2 \tag{7}$$

$$C_nH_m + nO_2 \leftrightarrow nCO_2 + \frac{m}{2}H_2 \tag{8}$$

Zbylé části vstupní suroviny které nebyly zplynovány kyslíkem reagují s vodní parou za vzniku vodíku a oxidu uhelnatého dle rovnice:

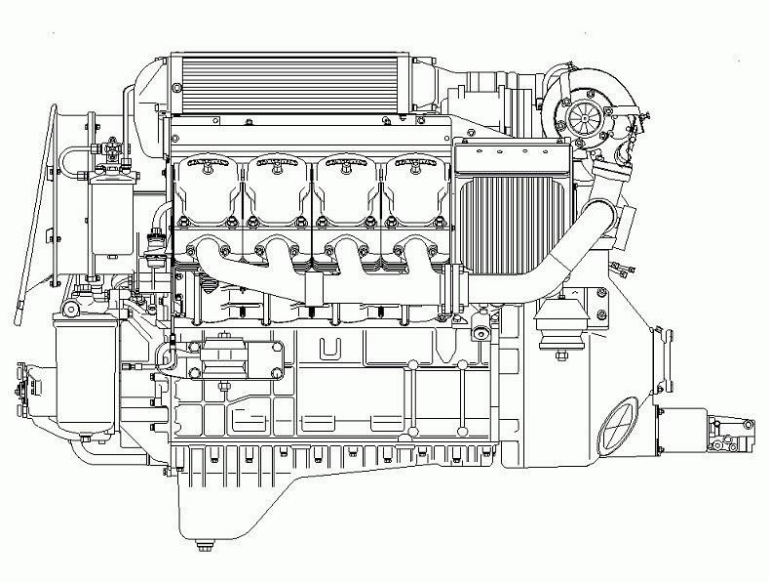
$$C_nH_m + nH_2O \leftrightarrow nCO + \left(n + \frac{m}{2}\right)H_2 \tag{9}$$

Souběžně probíhají v reaktoru ještě další reakce, ale výsledkem parciální oxidace je vždy plynná směs složená z $\mathrm{CO}, \mathrm{CO_2}, \mathrm{H_2O}, \mathrm{H_2}, \mathrm{CH_4}, \mathrm{H_2S}$ a COS

Následně je plynná směs vedena do kotle, kde se využije její teplota na výrobu vodní páry. Po výstupu z kotle je směs ochlazena a dalšími procesy jsou odstraněny saze a nežádoucí plyny. Například parciální oxidací mazutu lze získat plyn o složení: $98\ obj.\%\ \mathrm{H_2}, 0{,}8\ obj.\%\ \mathrm{CH_4}\ a\ 1{,}2\ obj.\%\ \mathrm{N_2} + \mathrm{Ar}$ [14].

4 Popis motoru vybraného pro přestavbu

Pro přestavbu byl vybrán motor používaný ve vozidlech Tatra T815. Motory se vyráběly v několika verzích. Nejdříve bylo vozidlo poháněno vznětovým desetiválcem bez přeplňování (T3-929). Vzhledem ke konstrukci motoru, kdy se jedná v podstatě o jednotlivé hlavy válců (Obr.2) a segmentově sešroubovaný klikový hřídel v bloku motoru se do nabídky brzy dostaly i osmiválce (T3-928) a dvanáctiválce (T3-930). Všechny výše zmíněné motory jsou vzduchem chlazené [15]. Postupným vývojem a s rostoucími nároky na emise a spotřebu paliva byly motory přeplňované turbodmychadlem a pro splnění normy EURO IV a V byl přidán systém SCR.

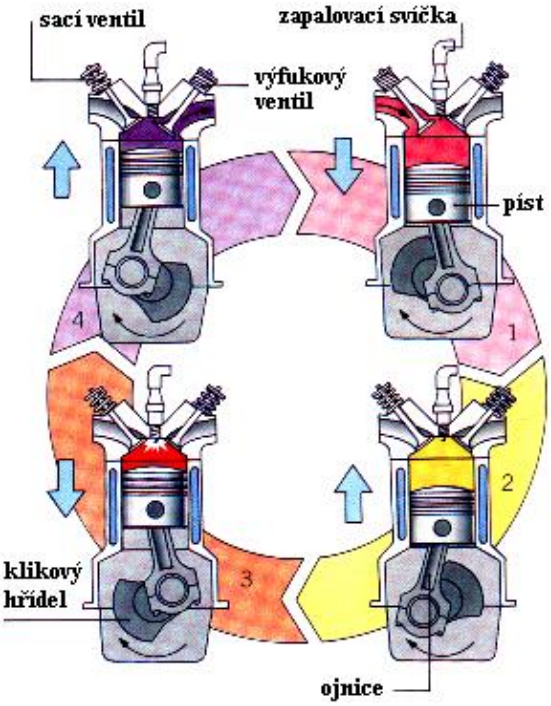


Obr. 3 - Motor T3B-928-70 [16]

Každá hlava válce má jeden sací a jeden výfukový ventil. Ventily jsou ovládané rozvodem OHV. Vačková hřídel je umístěna v bloku motoru a přes tyčky působí na vahadla v hlavě válců. Vahadla poté ovládají jednotlivé ventily. Pro přestavbu je tato koncepce vhodná z hlediska zástavbových rozměrů. Mezi vahadly je dostatek místa pro umístění zapalovacího kabelu a svíčky. Pro výzkumné účely byl motor zredukován na jednoválcový s upravenou klikovou skříní.

5 Pracovní fáze čtyřdobého spalovacího motoru

Aby bylo možné v motoru spalovat směs vodíku a vzduchu, je nezbytné změnit i způsob jeho činnosti. V našem případě dojde ke změně ze vznětového motoru na zážehový. Místo původního vznícení směsi nafty a vzduchu prudkým nárůstem teploty při kompresní fázi bude nyní směs zažehnuta zapalovací svíčkou umístěnou místo vstřikovače paliva.



Obr. 4 - Ottův cyklus [17]

Pracovní fáze čtyřdobého spalovacího motoru [18]:

1. *Sání:* Sací ventil je otevřený, výfukový ventil je zavřený, nedochází ke spalování. Nejdříve se s předstihem otevře sací ventil. Píst se pohybuje směrem dolů do dolní úvrati. Tím dochází k nasávání směsi do válce. Sací ventil zůstává po dosažení dolní úvrati ještě několik stupňů natočení klikové hřídele otevřený, aby se setrvačností proudění válec co nejvíce naplnil. V současné době se často využívá přeplňování pomocí dmychadla.

2. *Komprese:* Sací i výfukový ventil je uzavřený. Píst se pohybuje směrem vzhůru a stlačuje směs. Krátce před dosažením horní úvrati je směs zapálena zapalovací svíčkou. (Před přestavbou by došlo ke vstřiku nafty a následnému samovznícení)

3. *Expanze:* Pracovní zdvih. Sací i výfukový ventil uzavřený. Dochází k hoření zapálené směsi. Ve válci roste teplota a tlak. Tím je píst tlačen do dolní úvrati a přes ojnici otáčí klikovou hřídelí. V okamžiku před dosažením dolní úvrati se otevře výfukový ventil a spalované plyny se vysokou rychlostí rozproudí z válce.

4. *Výfuk:* Sací ventil je uzavřený, výfukový ventil je otevřený, nedochází ke spalování. Píst se pohybuje směrem do horní úvrati a vytlačuje zbylé výfukové plyny.

6 Spalování vodíku v pístových motorech

Spalovaní vodíku v pístových motorech přináší řadu výhod plynoucích z jeho vlastností, pro jejichž využití je nutné upravit konstrukci motoru. Základní parametry vodíku jako paliva ve srovnání s naftou a benzínem jsou uvedeny v Tab.1.

Palivo	Nafta	Benzín	Vodík
Chemický vzorec	$C_8 - C_{20}$	$C_4 - C_{12}$	H_2
Stechiometrický poměr [-]	14,5:1	14,7:1	34:1
Výhřevnost [MJ/kg]	42,4	44,5	119,9
Rozsah zápalnosti (obj. % ve vzduchu) [-]	0,7-5	1,4-7,6	4-75
Iniciační energie	-	0,24 mJ	0,02 mJ

Tab. 1 – Porovnání paliv [19]

Vlastnosti palivové směsi

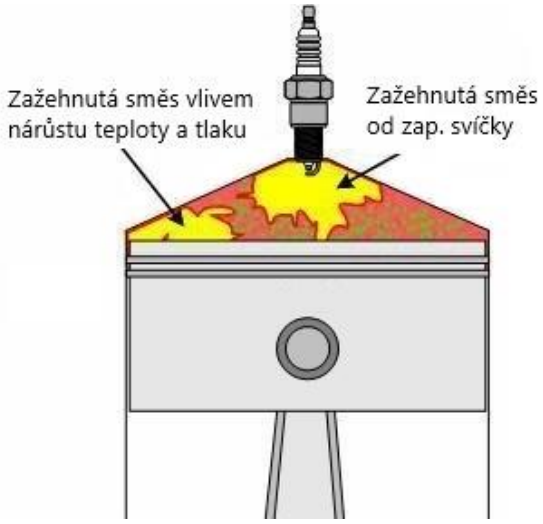
Jedna z vlastností přímo související se zapalováním a konstrukcí motoru je vysoká difuzivita vodíku. Tím je zajištěna vysoká homogenita zapalované směsi (dochází k lepšímu promíchání vodíku se vzduchem). Pokud k této vlastnosti přidáme ještě nízkou iniciační energii potřebnou k zažehnutí směsi, snižují se požadavky na výkon zapalovacího systému. Nízká iniciační energie je však spojena s následujícími riziky při spalování vodíku:

Předčasné vznícení (Pre-ingnition)

K předčasnému vznícení dochází samovolně před přeskokem jiskry zapalovací svíčky. Původem je rozžhavená část spalovacího prostoru (výfukový ventil, zapalovací svíčka), nebo právě kompresní teplo. Tím ztrácíme kontrolu nad časováním zapalování, doprovázené poklesem výkonu a zhoršení chodu motoru [20].

Zpětný zášleh (Backfire)

Zpětný zášleh do sání vzniká obdobným způsobem. Při tvoření směsi v sacím potrubí a jejím následném nasávání otevřeným sacím ventilem dojde k samovznícení a prohoření paliva až do sacích kanálů motoru. Při použití přímého vstřikování vodíku do válců ke zpětnému zášlehu nedochází, směs se tvoří přímo ve válci motoru [6].



Obr. 5 - Detonační spalování [21]

Detonační spalování (klepání)

Průvodcem detonačního spalování je charakteristický kovový zvuk motoru označovaný jako „klepání“. Detonační spalování nastává v okamžiku po zažehnutí směsi zapalovací svíčkou. Po přeskoku jiskry zažehnutá směs postupně prohořívá spalovacím prostorem za rostoucí teploty a tlaku. Právě vlivem zvýšených teplot a tlaku dojde k souběžnému zažehnutí ještě nespálené směsi v odlehlé části spalovacího prostoru (Obr. 4). V podstatě se jedná o nekontrolovatelné hoření s náhlým vzrůstem tlaku ve spalovacím prostoru [20].

Schopnost tvořit hořlavou směs

Mezi další rozdíly oproti konvenčním palivům patří široký rozsah schopnosti tvořit hořlavou směs se vzduchem a to 4-75 obj. % vodíku ve vzduchu [22]. Tato vlastnost nám umožňuje spalovat i velmi chudou směs s následnou úsporou paliva díky důkladnějšímu prohoření. Dále použitím chudé směsi dosáhneme nižších spalovacích teplot, což může být výhodné z hlediska limitů použitých materiálů. Dále omezíme problémy dané nízkou iniciační energií. S rostoucím přebytkem vzduchu dochází k prodloužení doby zážehu a poklesu rychlosti

spalování. Tím snížíme riziko detonačního spalování nebo vzniku předzápalu a následného zášlehu do sání, což je při spalování vodíku častý problém [8].

Kompresní poměr

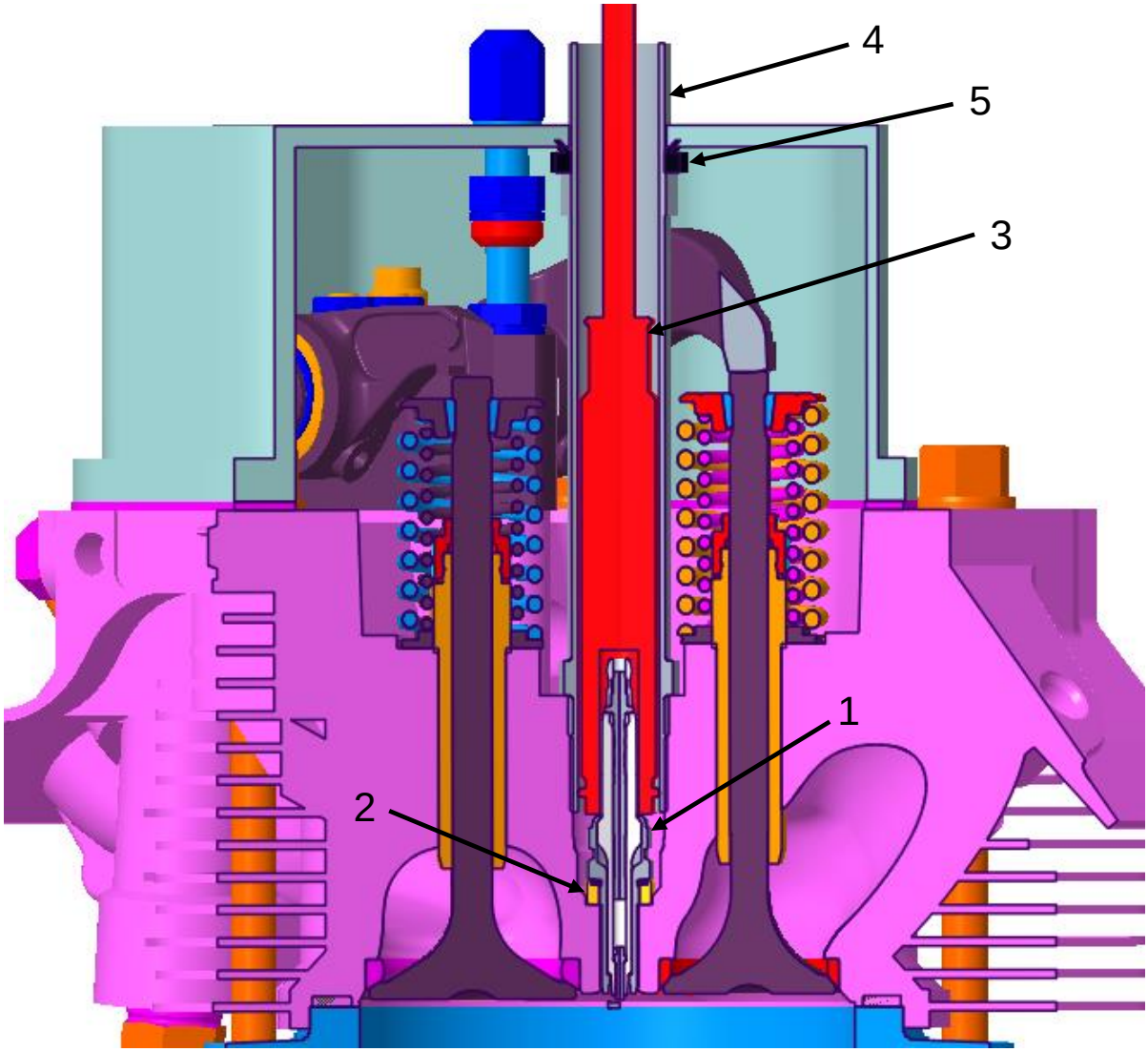
Dalším opatřením pro snížení rizika předzápalů a detonačního spalování je snížení kompresního poměru. Kompresní poměr je definován jako poměr objemu nasáté směsi do válce (píst je v dolní úvrati) k objemu stlačené směsi (píst v horní úvrati). U přestavby vycházíme ze vznětového motoru s kompresním poměrem 16,5:1 [15]. Při takovéto hodnotě dochází ke značnému nárustu teplot vlivem stlačení, což není pro spalování vodíku vhodné. Například automobilka BMW u svého testovacího vozidla Hydrogen 7 s benzínovým motorem V12 používá kompresní poměr 9,5:1 [23].

7 Návrh přestavby experimentálního motoru TATRA

V návrhu přestavby motoru jsou provedeny následující úpravy:

Byla provedena úprava hlavy válce pro instalaci zapalovacího systému s klasickou zapalovací svíčkou a jeho příslušenství (snímače otáček a polohy). Vstřikovač paliva umístěný mezi ventily v hlavě válce byl demontován.

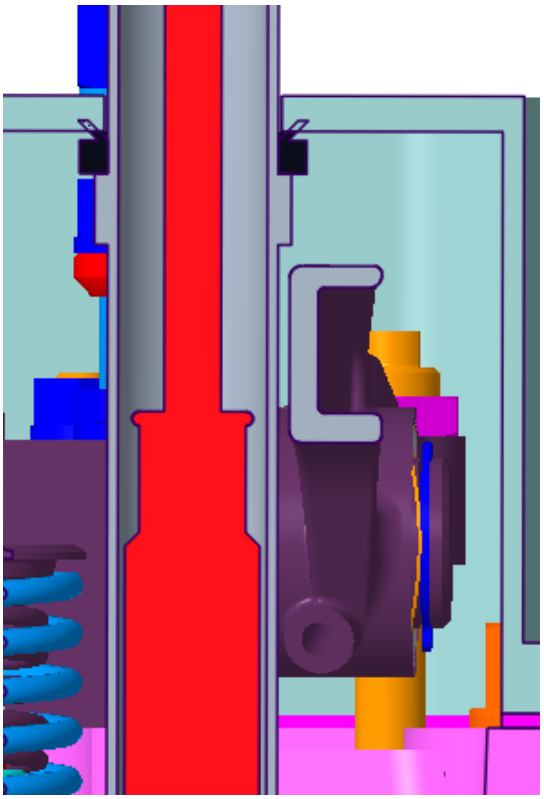
Pro přehlednost jsem v Obr. 6 označil jednotlivé komponenty čísly. Do vzniklého prostoru je umístěna zapalovací svíčka (1) s distančním kroužkem (2). Zapalovací svíčka s kabelem (3) je chráněna ocelovou trubkou (4) zašroubovanou do hlavy válců. Ochranná trubka vede zapalovací kabel skrze víko ventilů. Na trubku je ve vrchní části navlečen těsnící V-kroužek (5).



Obr. 6 - Popis součástí přestavby

8 Ověření realizovatelnosti úpravy spalovacího motoru

Nejpodstatnější z hlediska návrhu přestavby motoru byly zástavbové rozměry. Vzhledem k pohyblivým částem pod víkem ventilů nesmí v žádném případě dojít ke kolizi, neboť by hrozilo poškození motoru. Pro zjištění zástavbových rozměrů jsem v programu PTC Creo 4.0 vytvořil obálku maximálních rozměrů a z té určil bezpečné provozní rozměry.

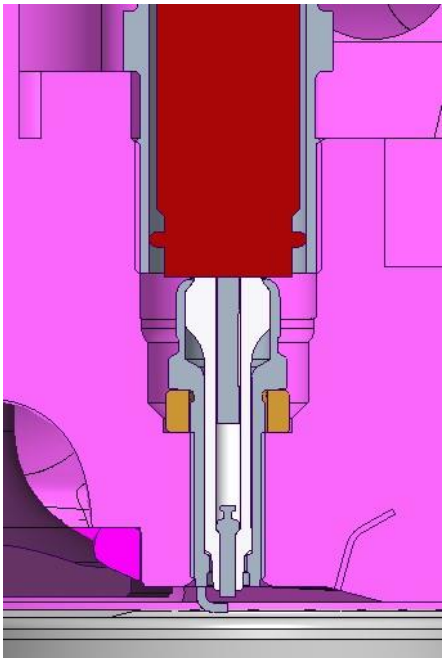


Obr. 7 - Kritické místo

Jako kritický rozměr byla vyhodnocena vzdálenost vahadla výfukového ventilu od ochranné trubky pro vedení zapalovacího kabelu (Obr. 7). Vahadlo jsem nastavil do obou krajních poloh a zjistil, kdy dochází ke kolizi. Z bezpečnostních důvodů byl průměr trubky zvolen 24 mm a tím vznikla provozní vůle 1,6 mm.

9 Umístění zapalovací svíčky

Pro zkušební motor byla zvolena zapalovací svíčka se závitem M10x26,5 a koncovkou SAE. Svíčka využívá upravený otvor pro palivový vstřikovač, který nebude po přestavbě využit. Tím je zajištěno z hlediska spalování výhodné umístění do osy válce motoru. Po konzultaci s výrobcem bylo zjištěno i úskalí tohoto řešení a tím je možné zkrácení životnosti hlavy válce. Svíčka prochází přímo mezi sacím a výfukovým ventilem. Vyřezáním závitu M10 se sníží tloušťka můstku mezi otvory pro ventily. Následkem může být prasknutí hlavy vlivem zvýšeného namáhání. Z toho důvodu byla provedena pevnostní analýza v kapitole 17. Posunutí otvoru zapalovací svíčky do méně namáhaného místa mimo osu válce není možné z důvodu kolizí s vahadly ventilů.



Obr. 8 - Umístění zapalovací svíčky

V počátku bylo přepokládáno použití svíčky M12, od kterého bylo upuštěno ze zástavbových rozměrů. Vyřezáním většího závitu by došlo k dalšímu ztenčení ventilového můstku. Svíčky M12 běžně využívají klíč č.16. Větší rozměry nástrčného klíče kolidují s průměrem u dosedací plochy svíčky a nebylo by možné jí dotáhnout. Pro svíčku M12 by navíc bylo nutné rozšířit i dosedací plochu (odstranit sražení u dna otvoru). Takový zásah by negativně ovlivnil pevnost hlavy válce. Z výše uvedených důvodů bylo upřednostněno použití svíčky M10.

Mezi původní dosedací plochu vstřikovače a svíčku je vložený měděný distanční kroužek, aby bylo zajištěno vhodné vysunutí zapalovací svíčky do spalovacího prostoru. Kroužek zároveň plní i těsnící funkci a odvádí teplo ze zapalovací svíčky do hlavy válce.

10 Zapalovací kabel

Na svíčku je nasazen zapalovací kabel NGK Racing CR-3. Jedná se o balení, které obsahuje 50 cm zapalovacího kabelu spojeného s fajfkou pro svíčky M10 až M14 a koncovkou SAE. Fajfka je vyrobená ze silikonu a její teplotní odolnost dosahuje až 220 °C [24]. Údaj teplotní odolnosti je důležitý z důvodu montáže do vzduchem chlazené hlavy. Vzduchem chlazená hlava dosahuje vyšších teplot než vodou chlazená, kde proudí kanály chladící kapalina a tím ochlazuje i vnitřní prostor hlavy. Ověření vhodnosti zapalovacího kabelu bylo provedeno z poskytnutých údajů provozních teplot motoru.

Obr. 9 - Zapalovací kabel NGK CR-3 [25]

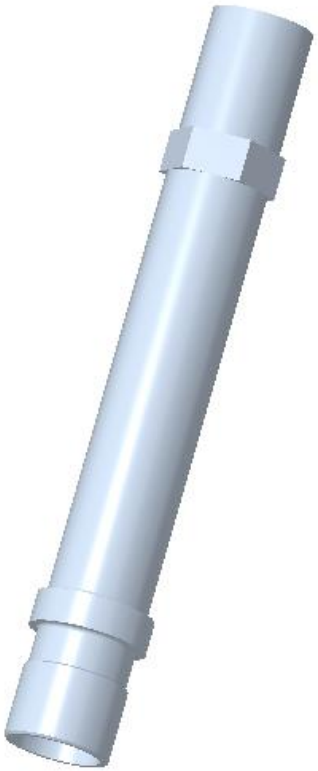
Během návrhu přestavby byla vytvořena poptávka u výrobce Tesla Blatná, který se zabývá prodejem náhradních dílů zapalování osobních vozidel. Bohužel v nabídce nebyl dostupný žádný vhodný zapalovací kabel. Kabel by bylo možné i vyrobit svépomocí z jednotlivých součástí, ale z důvodu spolehlivosti bylo vybíráno již hotové řešení.

Obr. 10 - Kabelová spojka [26]

Opačný konec kabelu je napojen spojkou na totožný kabel NGK s koncovkou SAE pro zapalovací cívku Bosch motorsport.

11 Vedení zapalovacího kabelu

Zapalovací kabel je v prostoru pod víkem ventilů veden v ochranné ocelové trubce. Důvodem zvoleného řešení je zvýšení spolehlivosti systému zapalování. Bez montáže trubky byl zapalovací kabel ostřikován olejem, který by se navíc hromadil v dutině kolem zapalovací svíčky. To by mohlo mít za následek narušení izolace zapalovacího kabelu a následné vynechávání zapalování. Dalším rizikem by byla kolize neupevněného zapalovacího kabelu s pohyblivými součástmi pod ventilovým víkem – vahadla, ventilové pružiny atd.

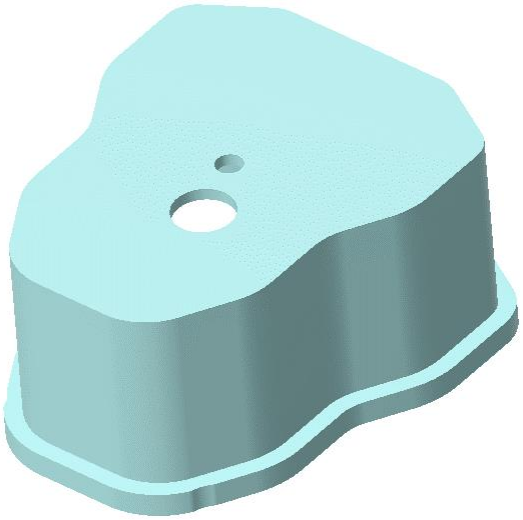


Obr. 11 - Vedení zapalovacího kabelu

Ochranná trubka se jedním koncem zašroubuje do závitu vytvořeného v hlavě válců a utěsní teflonovou páskou. Tím bude zabráněno průniku motorového oleje do prostoru zapalovací svíčky. Na opačném konci trubky je vytvořen šestihran pro klíč č. 24 O šestihran je opřen V-kroužek. V-kroužek dosedá na víko hlavy válců, kterým trubka prochází a zabraňuje úniku oleje z motoru vrchem.

12 Víko hlavy válce

V prvotních návrzích se uvažovalo použití původního víka hlavy válce z důvodu finančních úspor. Při navrhování vedení zapalovacího kabelu a průchodu ochranné trubky víkem se vyskytly komplikace s tvarovou složitostí originálního víka. Vrchní stěna byla tvořena kulovou plochou, což znesnadňuje jakékoliv jeho úpravy, zejména zatěsnění průchodu ochranné trubky a montáž dalšího příslušenství.

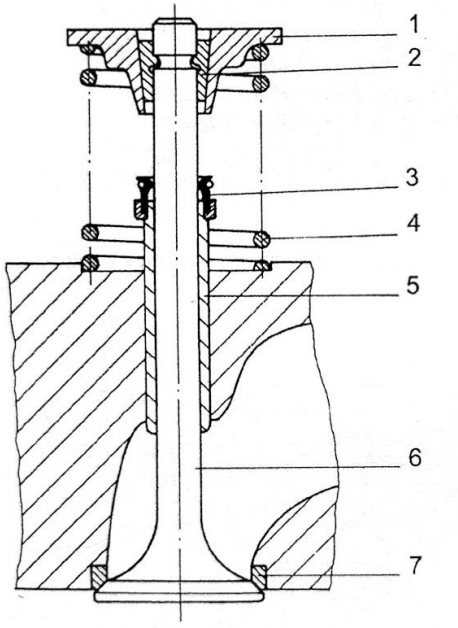


Obr. 12 - Návrh víka hlavy válců

Z výše uvedených důvodů bylo rozhodnuto o výrobě nového víka s rovnou stěnou. Víko je vyrobeno frézováním. Tloušťka bočních stěn je 3 mm a vrchní 5 mm. Do vrchní stěny jsou vyvrtány dva otvory. Menší pro šroub víka a větší pro průchod zapalovacího kabelu.

13 Materiál ventilových sedel

Nevýhodou vodíku je jeho nízká mazací schopnost. Zvýšené opotřebení se projevuje na vstřikovačích a ventilových sedlech [27]. Pro zachování životnosti motoru je nutné se zabývat i změnou materiálu ventilových sedel (na Obr.13 označeno číslem 7). Výfukové ventily dosahují narozdíl od sacích vyšších teplot (600 - 650 °C), neboť jsou ohřívány od proudících výfukových plynů. Je ověřeno, že přibližně 75% tepla z výfukového ventilu přechází do sedla. To je navíc také ohříváno proudícími spalinami. Z těchto poznatků vyplývá, že výfukové sedlo je mnohem náchylnější k případnému selhání právě zvýšeným namáháním. Při spalování plynných paliv v pístových motorech dochází ke zvýšení spalovacích teplot a tím i opotřebení ventilů a jejich sedel [18] [28] [29].



Obr. 13 - Součásti ventilového rozvodu [18]

Vinou zvýšeného tepelného namáhání po přestavbě motoru může dojít k urychlení degradace materiálu a narušení těsnosti mezi ventilem a sedlem. To má za následek řadu negativních dopadů na chod motoru a životnost jeho komponentů. Nejčastěji dochází k rychlému opotřebení ventilového sedla výfukového ventilu [28]. Následně vlivem netěsnosti kolem něj proudí horké výfukové plyny i v expanzní (pracovní) fázi spalovacího motoru a dojde k jeho tzv. podpálení.

V současné době se ve spalovacích motorech používají převážně hlavy válců z hliníkových slitin s vloženými ventilovými sedly. Tak je tomu i v případě přestavovaného motoru TATRA. Hlavní předností toho konstrukčního řešení je možnost použití rozdílných materiálů hlavy válců a samotného sedla [30]. Podle údajů od automobilky TATRA jsou sací ventilová sedla vyrobena z lité oceli EKDY 42 2999.4 (chemické složení odpovídá oceli 19 437). Výfuková sedla jsou vyrobena z materiálu pod označením TRW HT+. Jejich složení výrobce nezveřejňuje. Z dostupných informací se jedná o sedla s vysokou teplotní odolností určená pro motory spalující plynná paliva (LPG, CNG) [31]. Měla by tedy být dostatečně vhodná i pro spalování vodíku.

13.1 Výměna ventilových sedel

Pokud by se materiál ventilových sedel i přes jejich specifikaci pro plynná paliva ukázal v provozu jako nedostatečně odolný, nahrazení původních ventilových sedel odolnějšími můžeme provést hned několika způsoby. Při výměně je nutné nejprve vyjmout původní ventilová sedla z hlavy válce a to následujícími způsoby:

Vyjmutí ohřevem

Autogenem ohříváme ventilové sedlo na jednom místě jeho obvodu, dokud nezačne docházet k natavení. Poté necháme ventilové sedlo zchladit a vyjmeme jej. Ohřevem dojde k deformaci a uvolnění třecích sil vzniklých při zalisování. Výhodou této metody je, že zachováme původní styčnou plochu uložení sedla v hlavě válců [32].

Vyjmutí návarem

Pro vyjmutí sedla bez porušení hlavy válců je možné provést návar na vnitřní stranu sedla. Návarem dojde ke zmenšení průměru sedla a jeho snadnému vyjmutí. Výrobce motorů TATRA doporučuje v dílenské příručce právě tento způsob provedení z důvodu jeho šetrnosti. [15]

Vyjmutí nařízntím

Ventilové sedlo opatrně nařízneme úhlovou bruskou s malým průměrem kotouče. Dáváme pozor abychom nezasáhli do hlavy válců. Nařízntím se ventilové sedlo stane poddajnějším a lze snáze vyjmout, popřípadě jej nařízneme na více místech.

Vyjmutí frézováním

Vyjmutí ventilových sedel může být provedeno i odfrézováním původních sedel. Tímto způsobem je nutné následně vytvořit nové uložení ventilového sedla v hlavě válců a zvolit nová sedla s odpovídajícím přesahem. Pro tyto případy jsou nabízeny výrobcem dvě náhradní sady ventilových sedel se zvětšenými rozměry [15].

13.2 Montáž ventilových sedel

Při montáži ventilových sedel opět využijeme teplotní roztažnosti materiálu. Pro snížení přesahu a lisovací síly ochladíme ventilová sedla a ohřejeme hlavu válců. Ochlazení ventilových sedel se provádí ponořením do kapalného dusíku. Hlavu válců ohřejeme v elektrické troubě nebo nahříváme plynovým hořákem. V každém případě musí být ohřátí hlavy válců pozvolné, aby nedošlo ke vzniku vnitřního pnutí a následným prasklinám. Po dosažení dostatečného teplotního rozdílu nalisujeme vhodným přípravkem sedla ventilů do hlavy válců [33].

14 Systém zapalování

Při konverzi motoru dojde k jeho změně na zážehový, kde je směs paliva a vzduchu zapalována vnějším zdrojem. Je tedy nezbytné provést dodatečnou instalaci zapalování. Zapalovací zařízení transformuje napětí akumulátoru ve vozidle na 8 až 35 tisíc voltů, aby došlo k přeskočení jiskry na svíčce a zapálení směsi [34].

Pro spalovací motory bylo vyvinuto několik různých typů zapalovacích systémů. Od prvních zapalování pracujících na čistě mechanickém principu až po plně elektronické systémy. Experimentální motor bude osazen plně elektronickým zapalováním BOSCH s jednojiskrovými cívkami (Obr. 14).

Obr. 14 - Zapalovací cívka Bosch [35]

Zapalování se skládá ze zapalovací svíčky, zapalovacích kabelů a zapalovacích cívek nebo transformátorů, řídící jednotky nebo v případě starších systémů rozdělovače.

14.1 Zapalovací kabel

Zapalovací kabel vede vysoké napětí ze zapalovací svíčky nebo transformátoru. Porušení jeho izolace je jednou z nejčastějších příčin poruchy zapalování, jelikož dochází k přeskoku jiskry na kovové součásti v motorovém prostoru (zkrat na kostru) a nikoliv na elektrodách svíčky.

14.2 Řídící jednotka

Řídicí jednotka nahrazuje funkci rozdělovače a dalších součástí zapalování, které zde nebyly zmíněny a jejich funkce byla řešena většinou mechanicky. Nyní je řízení běhu motoru prováděno jedinou součásti obsahující mikroprocesory regulující požadované veličiny na základě předem nastavených hodnot v paměti. S vysokým nárůstem výpočetního výkonu se jedná o velmi přesnou a rychlou regulaci zlepšující vlastnosti motoru [36]. Pomocí senzorů jsou také sledovány polohy klikové a vačkové hřídele experimentálního motoru. Na jejich základě dochází k řízení zapalování.

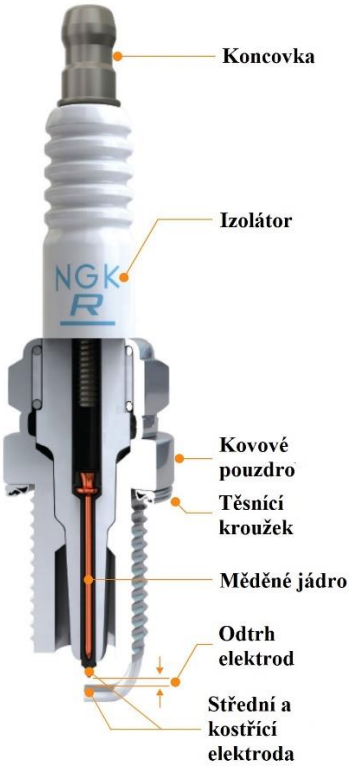
Pro správnou funkci zapalování je nezbytně nutné určit v jaké fázi cyklu jsou jednotlivé válce spalovacího motoru. Určení pouze polohy klikové hřídele v tomto případě není dostatečné. Představme si čtyřválcový řadový spalovací motor. Při otáčení klikovou hřídelí se vždy dva krajní a dva prostřední válce pohybují společně. Za těchto okolností není možné rozlišit, který válec ze dvojice je v kompresní nebo výfukové fázi, popřípadě v sací a expanzní fázi. Z tohoto důvodu je určována poloha vačkové hřídele. Ta má oproti klikové hřídeli poloviční otáčky a tím nám zajistí správné určení pracovní fáze válců [34].

14.3 Zapalovací svíčka

Zapalovací svíčka je zašroubována do hlavy válce a zasahuje do spalovacího prostoru. Používá se u zážehových motorů, kde přeskokem elektrické jiskry mezi elektrodami dojde k zapálení směsi. Namáhání svíčky během provozu je zejména tepelné a je nutné dosáhnout stanovené provozní teploty. Provozní teplota se pohybuje mezi 500 - 850 °C. Dolní hranice je tzv. samočistící teplota, kdy shoří karbonové úsady negativně ovlivňující elektrickou vodivost elektrod svíčky. Při nahromadění usazenin může docházet k přeskoku jiskry mimo elektrody do kovového pouzdra svíčky. Naopak při překročení provozní teploty muže docházet k samozápalům od přehřáté části svíčky a v krajním případě až k roztavení elektrod [37] [38].

Vzdálenost elektrod (odtrh)

Vzdálenost elektrod (Obr. 15) má vliv na délku elektrického oblouku vznikajícího mezi elektrodami. Pokud je vzdálenost malá, je zapotřebí menší přeskokové napětí. Zároveň dochází ke zmenšení zápalné energie, což snižuje schopnost zapálení směsi. Velká vzdálenost elektrod naopak vyžaduje vysoké zapalovací napětí. Dochází tedy ke zvýšení zápalné energie, ale při velkém odtrhu vzniká riziko vynechávání zapalování, kdy zapalovací cívka (trafo) nemusí být schopná vytvořit dostatečné napětí k přeskoku jiskry [34].

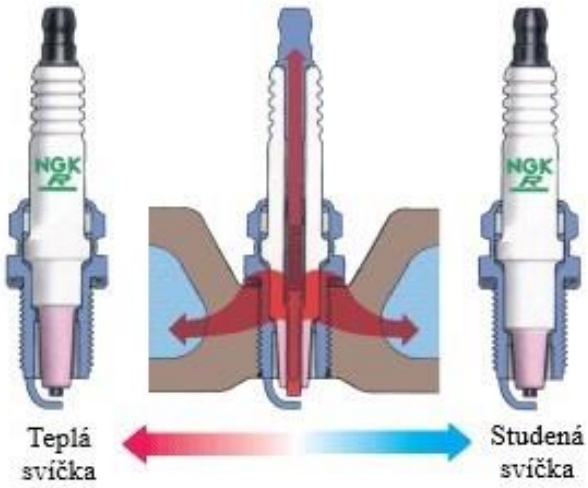


Obr. 15 - Konstrukce zapalovací svíčky [39]

Tepelná hodnota svíčky

Tepelná hodnota svíčky vyjadřuje tepelnou zatížitelnost svíčky, která se liší podle konstrukce motoru a přímo ovlivňuje jeho chod. Za běhu motoru je svíčka zahřívána spalováním směsi. Pokud by měla nízkou tepelnou vodivost, mohlo by dojít k jejímu nadměrnému zahřívání a vzniku samozápalů od její přehřáté části. Takovou svíčku označujeme jako „teplou“. Naopak svíčka s vysokou tepelnou vodivostí by nemusela ani dosáhnout samočistící teploty, což je také nežádoucí jev. Tepelná hodnota svíčky je určena způsobem její konstrukce. Pro „teplou“ svíčku je charakteristická dlouhá špička izolátoru

střední elektrody ve spodní části. To má za následek omezení prostupu tepla do kovového pouzdra a tedy dosahuje vyšších teplot. U studené svíčky je naopak špička izolátoru krátká a přijaté teplo je rychle odváděno, jak je znázorněno na Obr. 16 [34] [37].



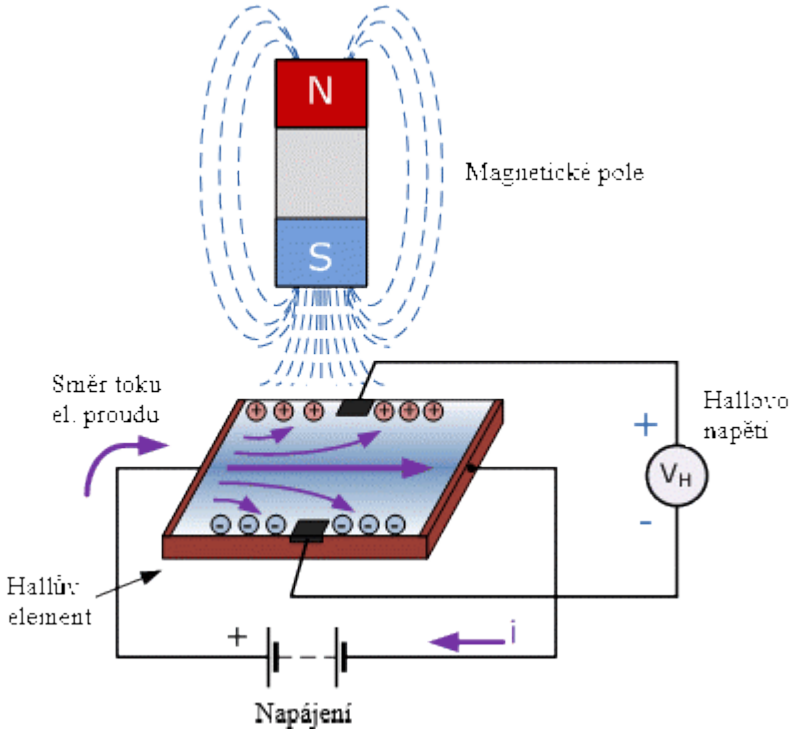
Obr. 16 - Tepelná hodnota svíčky [38]

Z hlediska návrhu přestavby experimentálního motoru bude nutné vybrat vhodnou zapalovací svíčku. Je nutné brát v potaz, že při spalování vodíku dochází k nárůstu spalovacích teplot. Na základě výše uvedených vlastností bych pro přestavbu předběžně volil „studenou“ svíčku. Provozní teploty svíčky však závisí na konstrukci motoru a jejím umístění ve spalovacím prostoru. Pro ověření volby tepelné hodnoty svíčky by bylo možné vycházet z teplotní analýzy nebo provést výběr experimentálně.

15 Snímače polohy a otáček

15.1 Hallův snímač

Hallův snímač je založen na principu Hallova jevu. Signál snímače v podobě Hallova napětí je vyvoláván změnami magnetického pole v jeho blízkosti. Hlavní součástí snímače je tzv. Hallův element. Hallův element je tvořený polovodičovou destičkou. Pro správnou funkci Hallova snímače je nezbytné jeho připojení ke zdroji napětí. Při indukci magnetického pole v elementu působí na procházející elektrony ze zdroje napětí Lorentzova síla, která je vychyluje k boční straně polovodičové destičky. Změna rozložení elektronů vyvolá rozdílný potenciál na bočních stěnách a vznik rozdílového (Hallova) napětí. Pokud není v dosahu polovodičového elementu magnetické pole, je rozdíl napětí nulový (rozložení elektronů je rovnoměrné) [34] [40].



Obr. 17 - Princip funkce Hallova elementu [40]

V pístových spalovacích motorech se používá upravené provedení Hallova snímače. Zjednodušeně by se dalo říci, že došlo k obrácení jeho funkce. Hallův element je umístěn ve společném pouzdře s permanentním magnetem. Při přiblížení ferromagnetického materiálu dochází k vychýlení magnetického pole. Změna magnetického pole je opět svázána se změnou Hallova napětí [40].

15.2 Indukční snímač

Základy indukčního snímače tvoří permanentní magnet, indukční vinutí a jádro. I u toho snímače je používán ozubený kotouč. Při otáčení kotouče se mění magnetické pole v indukčním vinutí a snímač generuje střídavé napětí (Obr.18). Při nejmenší vzdálenosti zubu od snímače je amplituda střídavého napětí nejvyšší. Po vzdálení zubu se změnou magnetického toku obrátí polarita napětí [34].

Obr. 18 - Průběhy výstupního signálu [41]

Na rozdíl od Hallova snímače indukční snímač nevyžaduje žádné přídavné napájení. Pokud se však hřídel neotáčí, je signál ze snímače nulový a není možné určit její polohu. Umístění snímače je obvykle na skříni převodovky u setrvačníku. Setrvačník s ozubením pro startér tvoří otáčející se kotouč dostačující pro použití senzoru. Je možné i vytvoření nepravidelných nálitků na setrvačníku a měření na nich. Nepravidelné značky nám slouží ve spojení s Hallovým snímačem na vačkové hřídeli ke vzájemnému přiřazení úhlů klikové a vačkové hřídele. Z přiřazení úhlů hřídelů řídící jednotka rozpozná správné časování rozvodů. Primární funkcí ale stále zůstává měření otáček [34].

15.3 Optoelektronický snímač

Optoelektronický snímač místo ocelových ozubených kotoučů používá clonu se štěrbinami. Clona plní funkci jednocestné světelné závory. Na jedné straně optické clony je nejčastěji trvale svítící infračervená dioda. Pokud se clona natočí štěrbinou před svítící diodu, záření začne dopadat na fototranzistor na protější straně. Fototranzistor funguje na principu řízení průchodu elektrického proudu v závislosti na intenzitě dopadajícího záření. V tomto případě s využitím clony je tranzistor využíván pouze ve spínacím režimu. Při dopadu záření je signál v řídící jednotce vyhodnocen jako logická 1 a v opačném případě jako logická 0 [34] [42].

16 Umístění snímačů zapalování

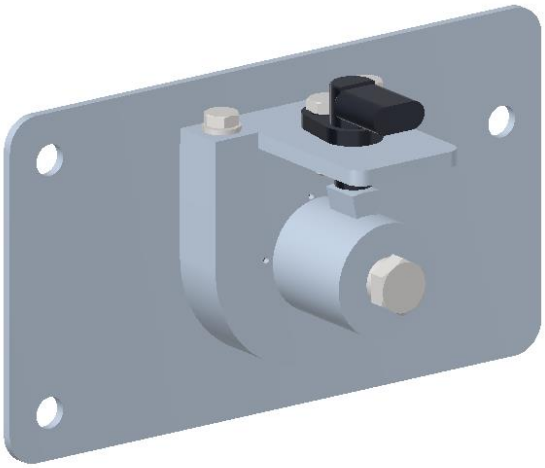
16.1 Snímač otáček klikové hřídele

Snímač klikové hřídele je umístěn v držáku na straně klikové skříně se setrvačníkem. Na setrvačníku je 32 výstupků pro měření otáček. V přípojném plechu jsou vytvořeny drážky umožňující nastavení požadované vzdálenosti snímače.

Obr. 19 - Držák snímače klikové hřídele

16.2 Snímač polohy vačkové hřídele

Pro snímání polohy vačkové hřídele byl vytvořen kroužek s výstupkem dle specifikací pro řídící jednotku Bosch. Snímač je umístěn na opačné straně klikové skříně v upraveném víku výstupního hřídele vstřikovacího čerpadla. Otáčky hřídele vstřikovacího čerpadla odpovídají otáčkám vačkového hřídele.



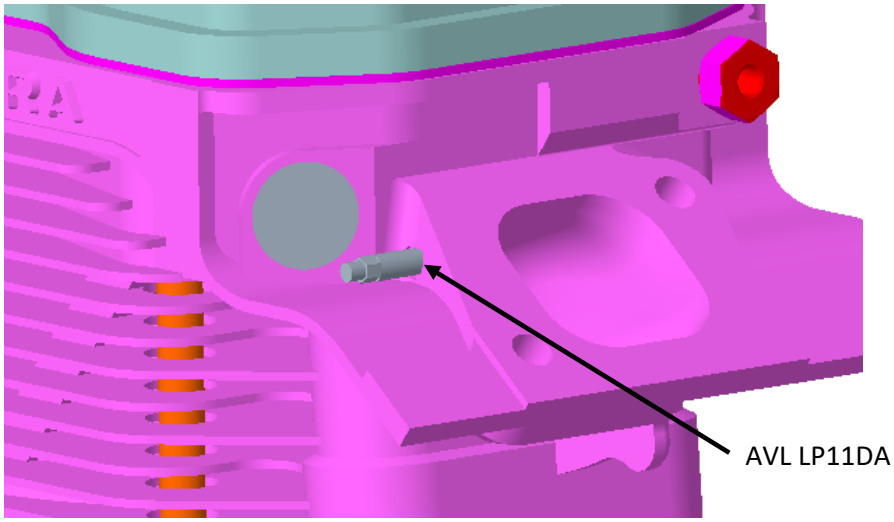
Obr. 20 - Víko se snímačem otáček

17 Umístění snímačů pro třítlakovou analýzu (TPA)

Pro vytvoření prediktivního modelu spalování v simulačním software (GT-Power) se využívá tzv. třítlaková analýza. Je zaznamenáván tlak v sání, spalovacím prostoru a výfuku. Následný model slouží k výpočtu a optimalizaci parametrů spalovacího motoru [43]. Umístění snímačů bude využito při následných experimentech na upraveném motoru.

17.1 Snímač tlaku nasávaného vzduchu

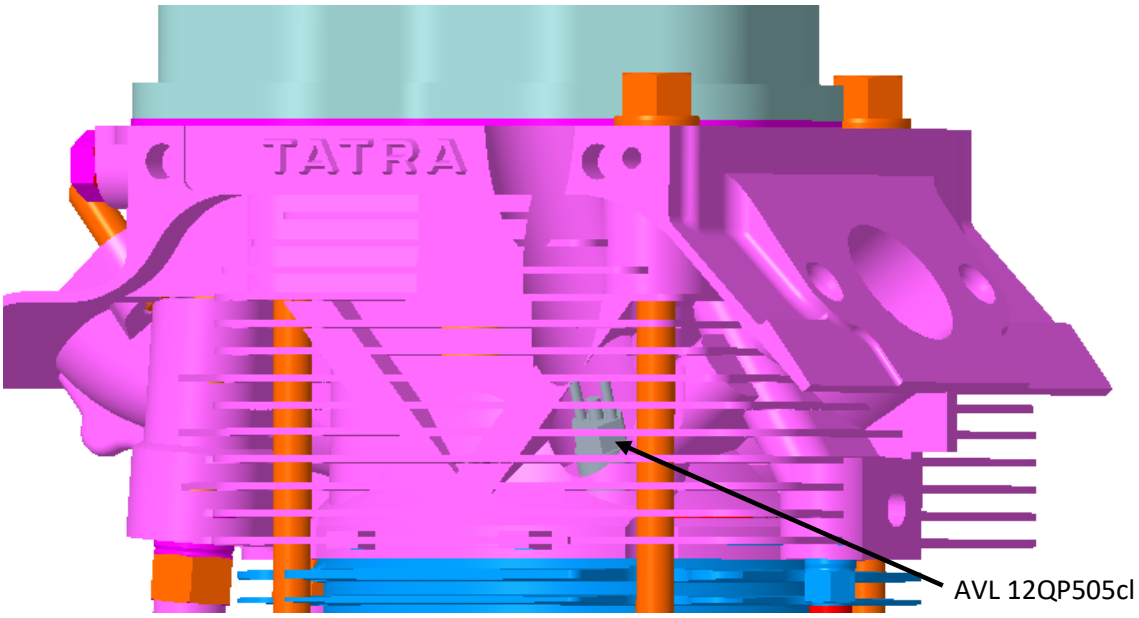
Snímač tlaku nasávaného vzduchu AVL LP11DA je umístěn z boku do sacího kanálu hlavy válce. V sacím kanálu je zvenku vytvořen otvor se závitem M5 a vyfrézovaná dosedací plocha snímače. Umístění mimo osu kanálu bylo zvoleno k dosažení minimální požadované délky závitu dle technické dokumentace snímače [44].



Obr. 21 - Umístění snímače AVL LP11DA

17.2 Snímač tlaku ve spalovacím prostoru

Instalace snímače tlaku ve spalovacím prostoru AVL 12QP505cl s chladícím pouzdrem byla navržena do již vytvořeného otvoru. Otvor se závitem M14 je vyústěný pod úhlem 21° a 1° od vertikální osy do spalovacího prostoru. Na vytvořeném modelu byly ověřeny zástavbové rozměry s kladným výsledkem, do hlavy válce nebude nutné v tomto ohledu nijak zasahovat.



Obr. 22 – Umístění snímače AVL 12QP505cl

17.3 Snímač tlaku výfukových plynů

Ke snímání tlaku výfukových plynů lze využít snímač AVL LP11DA v provedení s chladícím pouzdrem AE04. Z důvodu rozměrného chladícího pouzdra (závit M14) bude snímač umístěn do výfukových svodů.

18 Pevnostní analýza

Pevnostní analýza navržené úpravy hlavy válce byla provedena v PTC Creo Simulate 4.0. Ve výpočtu bylo uvažováno zatížení nejvyšším dovoleným tlakem ve spalovacím prostoru 14 MPa a střední teplotou 230 °C. Do modelu byly vloženy vazby (constrains) na blok motoru, silové působení šroubů v hlavě válců a tlak na uložení ventilových sedel.

18.1 Vstupní hodnoty pevnostní analýzy

18.1.1 Výpočet síly od hlavových šroubů

Hlava válce je s blokem motoru spojena čtyřmi šrouby M16. Šrouby se dle příručky utahují na předepsaný moment 130 Nm [15]. Tím dochází ke vzniku předepjatého spoje se silou působící na dosedací plochy hlavy válce.

Odečtené hodnoty z modelu:

Závit M16, $\mathrm{P} = 2,\ \mathrm{d}_2 = 14{,}701\ \mathrm{mm},\ \mathrm{d}_\mathrm{s} = 24{,}5\ \mathrm{mm}$

Zvolené hodnoty s ohledem na použité materiály:

Součinitel smykového tření v závitu $f_z = 0{,}15$

Součinitel smykového tření pod hlavou šroubu $f_m = 0{,}15$

18.1.2 Výpočet osové síly

Pro výpočet osové síly ve šroubu hlavy válce vycházím ze vzorce pro výpočet utahovacího momentu na klíči (10). Vzorec uvažuje stoupání závitu, tření v závitu a pod hlavou šroubu [45]

$$M_k = M_Z + M_M = \frac{1}{2} \cdot F_O \cdot d_2 \cdot tg(\gamma + \varphi') + \frac{1}{2} \cdot F_O \cdot d_s \cdot f_m \tag{10}$$

Redukovaný třecí úhel

$$f_z = tg(\varphi') \tag{11}$$

$$\varphi' = arctg(f_z) = arctg(0{,}15) = 8{,}53°$$

Úhel stoupání

$$\gamma = arctg\left(\frac{n \cdot P}{\pi \cdot d_2}\right) \tag{12}$$

$$\gamma = arctg\left(\frac{1 \cdot 2}{\pi \cdot 14{,}701}\right) = 2{,}48$$

Vyjádření

$$F_O = \frac{2M_k}{d_2 \cdot tg(\gamma + \varphi') + d_s \cdot f_m} \tag{13}$$

Dosazení

$$F_O = \frac{2 \cdot 130 \cdot 10^3}{14{,}701 \cdot tg(8{,}53 + 2{,}48) + 24{,}5 \cdot 0{,}15} = 39\,784{,}3 \text{ N}$$

18.1.3 Výpočet tlaku ve ventilových sedlech

V modelu použitém pro simulaci byly pro zjednodušení vyjmuty ventily. Spalovací tlak působící na talířek ventilu byl přepočítán na sílu do ventilových sedel dle vztahu (14). Plochy talířku ventilů byly odečteny v programu PTC Creo.

$$F = p \cdot S \tag{14}$$

Spalovací tlak $p = 14 \cdot 10^6\ Pa$

Plocha sacího ventilu $S_s = 1992{,}65\ mm^2$

Plocha výfukového ventilu $S_v = 1470{,}27\ mm^2$

Síla do sedel ventilů

$$F_S = 14.10^6 \cdot 1992{,}56 \cdot 10^{-6} = 27\,895{,}8\ \text{N}$$

$$F_v = 14.10^6 \cdot 1470{,}27 \cdot 10^{-6} = 20\,583{,}8\ \text{N}$$

Sací sedlo - rozklad sil

Úhel dosedací síly $\alpha = 30{,}5°$

Axiální síla $F_a = F_s \cdot \sin(\alpha) = 27\,895{,}8 \cdot \sin(30{,}5°) = 14\,158{,}2\ \text{N}$

Radiální síla $F_r = F_s \cdot \cos(\alpha) = 27\,895{,}8 \cdot \cos(30{,}5°) = 24\,035{,}8\ \text{N}$

Výfukové sedlo - rozklad sil

Úhel dosedací síly $\alpha = 44{,}5°$

Axiální síla $F_a = F_v \cdot \sin(\alpha) = 20\,583{,}8 \cdot \sin(44{,}5°) = 14\,425{,}4\ \text{N}$

Radiální síla $F_r = F_v \cdot \cos(\alpha) = 20\,583{,}8 \cdot \cos(44{,}5°) = 14\,681{,}4\ \text{N}$

18.1.4 Dosedací tlaky

Pro výpočet jsem vycházel ze vztahu (15). V programu PTC Creo jsem odečetl rozměry dosedacích ploch ventilových sedel. Následně jsem přepočítal dosedací síly ventilů na tlak v uložení ventilových sedel

$$p = \frac{F}{S} \tag{15}$$

Sací sedlo

$$p_{Sax} = \frac{F_a}{S_{sa}} = \frac{14\,158{,}2}{628{,}59 \cdot 10^{-6}} = 22{,}52\ \text{MPa}$$

$$p_{Srad} = \frac{F_r}{S_{sr}} = \frac{24\,035{,}8}{1187{,}52 \cdot 10^{-6}} = 20{,}24\ \text{MPa}$$

Výfukové sedlo

$$p_{Vax} = \frac{F_a}{S_{va}} = \frac{14\,425{,}4}{540{,}31 \cdot 10^{-6}} = 26{,}69\ \text{MPa}$$

$$p_{Vrad} = \frac{F_r}{S_{vr}} = \frac{14\,681{,}4}{1033{,}57 \cdot 10^{-6}} = 14{,}21\ \text{MPa}$$

18.1.5 Nalisovaný spoj

V simulaci byl zohledněn i tlak vzniklý nalisováním sedel do hlavy válců. Výpočet vychází z rovnice pro nalisované spoje (16). Ze známého přesahu a průměrů sedel lze dopočítat tlak p_2 působící ve stykové ploše sedla a hlavy válce [46].

$$\Delta r = \frac{2 \cdot r_2 \cdot (E^H \cdot K^N + E^N \cdot K^H)}{E^N \cdot E^H} + \frac{r_2 \cdot p_2 \cdot [E^H \cdot (1 + \nu^N) - E^N \cdot (1 + \nu^H)]}{E^N \cdot E^H} \tag{16}$$

Kde

$$K^H = K^{SEDLO} = \frac{p_1 \cdot r_1^2 - p_2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \tag{17}$$

$$K^N = K^{HLAVA} = \frac{p_2 \cdot r_2^2 - p_3 \cdot r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \tag{18}$$

Pro zjednodušení výpočtu byly tlaky p_1 a p_3 zanedbány. V prvním případě se jedná o tlak vzduchu působící na vnitřní průměr ventilového sedla v kanálu hlavy. I kdyby byl motor přeplňovaný, je tato hodnota při porovnání s tlakem p_2 způsobeným nalisováním zanedbatelná. Ve druhém případě se jedná o vnější tlak na hlavu válců. Hlava válců je obklopena atmosférickým vzduchem. Tuto hodnotu je opět možné zanedbat. Rovnice (17) a (18) mají tedy následující tvar:

$$K^H = K^{SEDLO} = -\frac{p_2 \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \tag{19}$$

$$K^N = K^{HLAVA} = \frac{p_2 \cdot r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \tag{20}$$

Rovnice (19) a (20) jsem dosadil do rovnice (16) a upravil ji do výsledného tvaru pro výpočet tlaku nalisovaného spoje p_2

$$p_2 = \frac{\Delta r}{\frac{2 \cdot r_2^3 \cdot \left(\frac{E^H}{r_3^2 - r_2^2} + \frac{E^N}{r_2^2 - r_1^2}\right)}{E^N \cdot E^H} + \frac{r_2 \cdot [E^H \cdot (1 + \nu^N) - E^N \cdot (1 + \nu^H)]}{E^N \cdot E^H}} \tag{21}$$

Rozměry a materiálové konstanty jsem odečetl v programu PTC Creo 4.0. Přesah pro nalisování byl určen z dílenské příručky Tatra s uvažováním původních (neopravovaných) sedel motoru. Vnější poloměr r_3 byl odečítán od středu sedla k nejbližší vnější hraně hlavy válce.

Označení	Popis	Sací sedlo	Výfukové sedlo
Δr	Lisovací přesah	0,1 mm	0,1 mm
r_1	Vnitřní poloměr sedla	23 mm	20,5 mm
r_2	Vnější poloměr sedla	27 mm	23,5 mm
r_3	Vnější poloměr	59 mm	67 mm

Tab. 2 – Hodnoty pro výpočet tlaku ve spoji

Materiál sacích a výfukových sedel byl určen jako ocel $E^H = 2{,}1 \cdot 10^5$ Pa, $\nu^H = 0{,}3$ a materiál hlavy válce jako hliníková slitina s konstantami $E^N = 0{,}7 \cdot 10^5$ Pa a $\nu^N = 0{,}33$.

Výše uvedené hodnoty byly dosazeny do rovnice (22) s následujícím výsledkem:

Sací sedlo

$$p_{2S} = \frac{0{,}1}{\frac{2 \cdot 27^3 \cdot \left(\frac{2{,}1 \cdot 10^5}{59^2 - 27^2} + \frac{0{,}7 \cdot 10^5}{27^2 - 23^2}\right)}{0{,}7 \cdot 10^5 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5} + \frac{27 \cdot [2{,}1 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0{,}33) - 0{,}7 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0{,}3)]}{0{,}7 \cdot 10^5 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5}}$$

$$p_{2S} = 67{,}23 \text{ MPa}$$

Výfukové sedlo

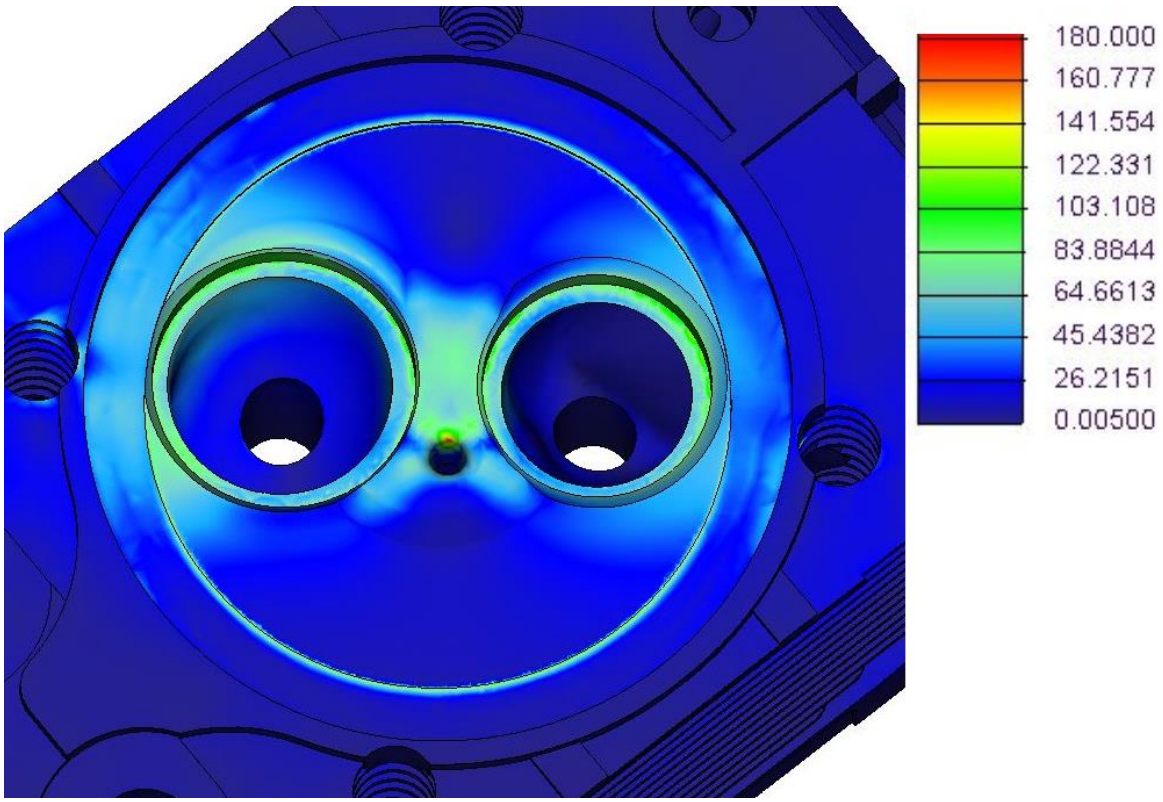
$$p_{2V} = \frac{0{,}1}{\frac{2 \cdot 23{,}5^3 \cdot \left(\frac{2{,}1 \cdot 10^5}{67^2 - 23{,}5^2} + \frac{0{,}7 \cdot 10^5}{23{,}5^2 - 20{,}5^2}\right)}{0{,}7 \cdot 10^5 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5} + \frac{23{,}5 \cdot [2{,}1 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0{,}33) - 0{,}7 \cdot 10^5 \cdot (1 + 0{,}3)]}{0{,}7 \cdot 10^5 \cdot 2{,}1 \cdot 10^5}}$$

$$p_{2V} = 75{,}09 \text{ MPa}$$

U sacího sedla je tlak v lisovaném spoji $p_{2S} = 67{,}23$ MPa, u výfukového $p_{2V} = 75{,}09$ MPa.

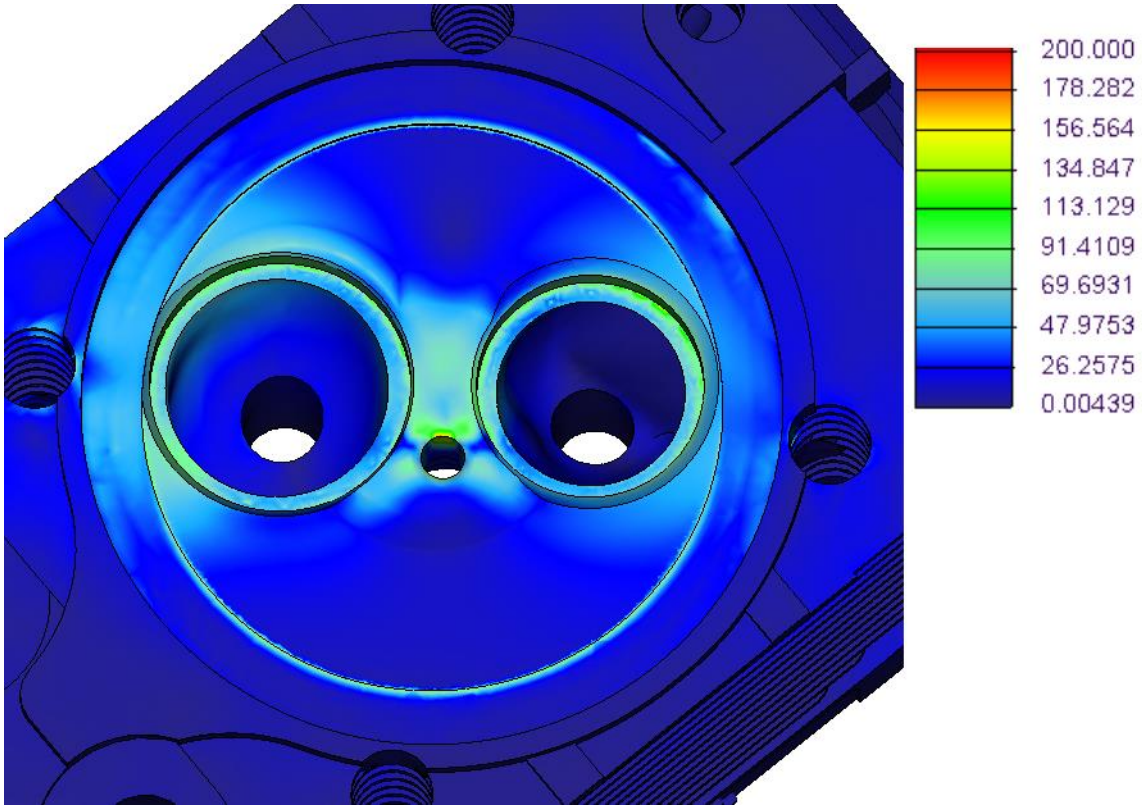
19 Vyhodnocení výsledků pevnostní analýzy

Vyhodnocení výsledků bylo provedeno jako statická analýza napětí podle hypotézy von Mises. Byly porovnávány dva případy, a to před úpravou a po úpravě hlavy válců. Výsledky analýzy se shodují s předpoklady vyslovenými při konzultaci s automobilkou TATRA, kde byl jako kritické místo označen můstek mezi sacím a výfukovým ventilem.

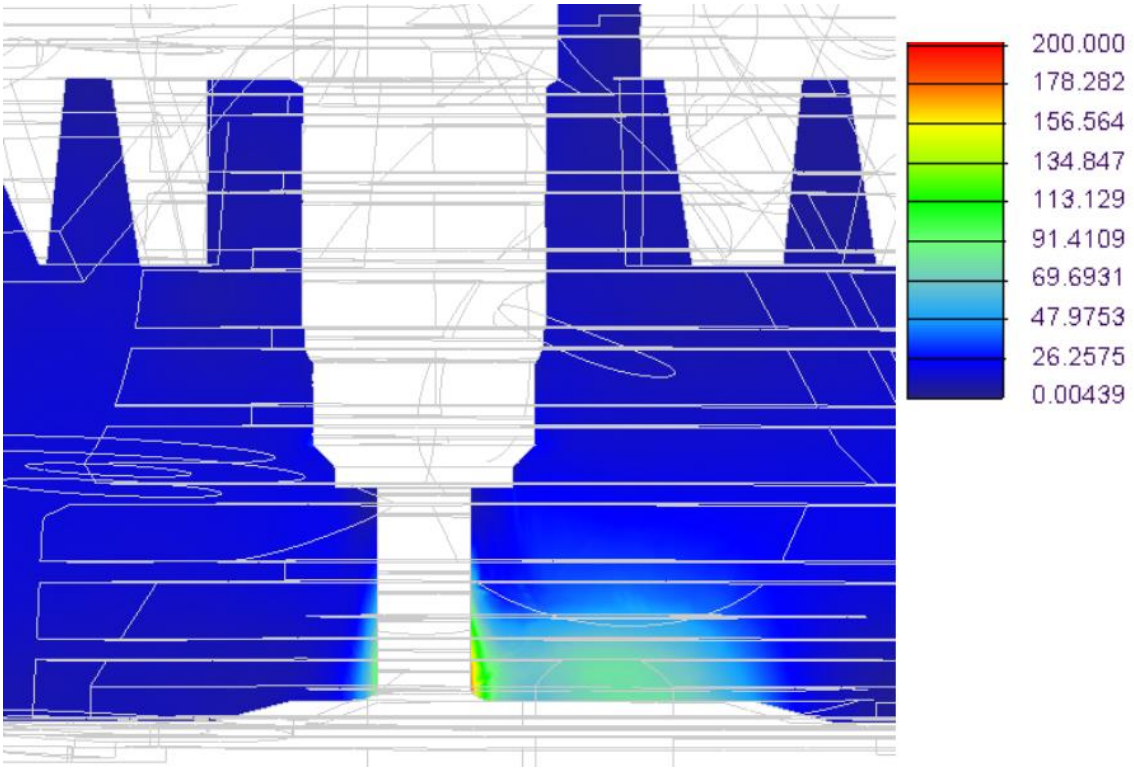


Obr. 23 - Rozložení napětí [MPa] před úpravou

Po provedení analýz bylo zjištěno maximální napětí právě v tomto místě. V případě původní hlavy válce dosahovala hodnota σ_{max-p} = 171,6 MPa (Obr.23). Po úpravě hlavy válce se hodnota zvýšila o 10,4 % na σ_{max-u} = 189,5 MPa (Obr.24, 25).



Obr. 24 - Rozložení napětí [MPa] po úpravě



Obr. 25 - Rozložení napětí [MPa] v ose ventilů

Dále byla výsledná hodnota porovnána s mezí kluzu hliníkové slitiny. Materiál hlavy válce byl určen jako slitina AlMgSi (EN AW 6xxx), která je obvykle používána na odlitky vzduchem chlazených hlav válců [33]. Hodnota smluvní meze kluzu $\mathrm{Rp}_{0,2}$ se pohybuje od 160 do 240 MPa [47]. Při uvažování cyklického zatížení jsou však tyto hodnoty nedostatečné, obvykle je dosahováno únavové pevnosti v rozmezí 70 až 100 MPa [48] [49].

Z důvodu mnoha neznámých faktorů, zejména neznámého konkrétního chemického složení a následného tepelného zpracování, byla úprava vyhodnocena na základě pevnostní analýzy. Zvýšení maximálního napětí v kritickém místě o 10,4 % by nemělo mít zásadní dopad na životnost součásti.

Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo navrhnout přestavbu vznětového motoru na vodíkový zážehový. V práci jsem se zabýval výběrem a návrhem komponent nezbytných pro instalaci elektronického zapalování. Veškeré práce jsem prováděl na 3D modelu poskytnutém výrobcem motoru v programu PTC Creo 4.0.

V úvodu práce jsem se zabýval smyslem samotné přestavby a jejím přínosem z hlediska snižování emisí. Dále jsem pokračoval návrhem úpravy hlavy válce pro montáž zapalovací svíčky. Ze zástavbových rozměrů byla vybrána zapalovací svíčka M10 s použitím zapalovacího kabelu NGK CR3. Svíčka i zapalovací kabel jsou ukryty v ochranné trubce procházející skrze víko hlavy válce s vyvedením zapalovacího kabelu.

Pro řízení zapalování byly zvoleny vhodné snímače na klikové a vačkové hřídeli. V prvním případě se jedná o indukční snímač Bosch IA-C, ve druhém o Hallův snímač od stejného výrobce. Na základě dokumentace řídící jednotky bylo navrženo snímací kolo polohy vačkového hřídele. Pro odečítání otáček klikové hřídele jsou využity výstupky na setrvačníku. Ze zjištěných rozměrů jsem navrhl držáky a umístění snímačů na bloku motoru. Do hlavy válce byly přidány i snímače pro třítlakovou analýzu (TPA). Pro veškeré úpravy byla vytvořena výkresová dokumentace.

Závěr práce je zaměřen na ověření proveditelnosti úpravy a její vliv na životnost motoru. V programu PTC Creo 4.0 jsem na základě poskytnutých provozních dat motoru provedl pevnostní analýzu. Z pevnostní analýzy bylo zjištěno zvýšení napětí o 17,9 MPa (10,4 %) v nejtenčí stěně mezi sacím a výfukovým ventilem. Výsledky analýzy se shodují s předpoklady výrobce motoru, který označil jako kritické místo právě ventilový můstek.

K práci jsem přistupoval se snahou o co nejmenší zásahy do samotné hlavy válců. Tím došlo pouze k mírnému zvýšení napětí v kritickém místě, které by nemělo mít zásadní vliv na životnost motoru. Z výkresové dokumentace na přiloženém CD a seznamu součástí tamtéž je možné práci využít pro následnou realizaci přestavby motoru.

Seznam použité literatury

[1] ŠURKALA, Milan. Modrý vodík u Shellu: zachytávání CO2 odstraňuje jen 48 % celkových emisí. In: *Svět hardware* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://www.svethardware.cz/modry-vodik-u-shellu-zachytavani-co2-odstranuje-jen-48-celkovych-emisi/56998

[2] JHALANI, Amit, Dilip SHARMA, Shyam Lal SONI, Pushpendra Kumar SHARMA a Sumit SHARMA. A comprehensive review on water-emulsified diesel fuel: chemistry, engine performance and exhaust emissions. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2019, **26**(5), 4570-4587 [cit. 2022-04-03]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-018-3958-y

[3] DAS, H.S., M.M. RAHMAN, S. LI a C.W. TAN. Electric vehicles standards, charging infrastructure, and impact on grid integration: A technological review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2020, **120** [cit. 2022-03-30]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2019.109618

[4] RIVARD, Etienne, Michel TRUDEAU a Karim ZAGHIB. Hydrogen Storage for Mobility: A Review. *Materials*. 2019, **12**(12), 1-12. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma12121973

[5] AUVINEN, Heidi, Tuuli JÄRVI, Matthias KLOETZKE, Ulrike KUGLER, Jan-André BÜHNE, Felix HEINL, Judith KURTE a Klaus ESSER. Electromobility Scenarios: Research Findings to Inform Policy. *Transportation Research Procedia* [online]. 2016, **14**, 2564-2573 [cit. 2022-04-03]. ISSN 23521465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2016.05.346

[6] Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies. LANZ, Andre, James HEFFEL a Colin MESSER. *Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies* [online]. 1.vydání. College of the Desert, Palm Desert, CA, USA: College of the Deser, 2001, s. 126-148 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/downloads/hydrogen-fuel-cell-engines-and-related-technologies-course-manual

[7] OLŠANSKÝ, Milan. Euro 6 - Čistému vše čisté!. In: *Automobil revue* [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/presunuto-na-trucker-cz-truck-bus/predstavujeme/euro-6-cistemu-vse-ciste_39739.html

[8] VÁVRA, Jiří, Zbyněk SYROVÁTKA a Michal TAKÁTS. *Use of Hydrogen in a Combustion Engine with an Advanced Combustion* [online]. Praha: ČVUT, 2021 [cit. 2022-04-09]. Dostupné z: doi:10.46720/F2021-CAF-034

[9] HORBAJ, Peter. VZNIK OXIDOV DUSÍKA A ICH VPLYV NA ROZPAD OZÓNOVEJ VRSTVY. *Chemické Listy* [online]. 1997, **91**(10), 833-839 [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1997_10_833-839.pdf

[10] KONIECZNY, A, K MONDAL, T WILTOWSKI a P DYDO. Catalyst development for thermocatalytic decomposition of methane to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008, **33**(1), 264-272. ISSN 03603199. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijhydene.2007.07.054

[11] KAMEŠ, Josef. *Alternativní palivo - vodík*. První. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-254-1686-0.

[12] HOVORKA, František. *Technologie chemických látek*. První. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 80-708-0588-9.

[13] SYROVÁTKA, Zbyněk. *Efektivní spalování alternativních paliv v pístovém spalovacím motoru*. Praha, 2020. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Michal Takáts, CSc.

[14] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0619-2.

[15] *Dílenská příručka nákladních automobilů Tatra 815*. 1. vyd. Kopřivnice: Tatra, 1989.

[16] Motor T3B-928-70. In: *Požáry.cz* [online]. [cit. 2021-11-09]. Dostupné z: https://www.pozary.cz/clanek/20153-flotila-tatrovackych-cisteren-chrani-dezu-mezi-praskovymi-a-kombinovanymi-vozy-nechybi-ani-cisterny/

[17] REICHL, Jaroslav. Čtyřdobý zážehový motor. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. [cit. 2021-12-04]. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/615-ctyrdoby-zazehovy-motor

[18] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.

[19] CINIVITZ, Murat a Husein KÖSE. Hydrogen use in internal combustion engine: A review. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies* [online]. 2012, **1**(1), 1-15 [cit. 2022-04-03]. ISSN 2146-9067. Dostupné z: https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/89368

[20] WANG, Zhi, Hui LIU a Rolf D REITZ. Knocking combustion in spark-ignition engines. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2017, **61**, 78-112 [cit. 2022-04-13]. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2017.03.004

[21] BENDER, Danny. Engine Knocking – Most common causes. In: *Danny's Engine portal* [online]. [cit. 2022-04-13]. Dostupné z:

https://secureservercdn.net/166.62.110.72/a86.30f.myftpupload.com/wp-content/uploads/Engine-Knocking-2.jpg?time=1649865620

[22] FAIZAL, M., L. S. CHUAH, C. LEE, A. HAMEED, J. LEE a M. SHANKAR. REVIEW OF HYDROGEN FUEL FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments* [online]. 2019, **42**(3), 35-46 [cit. 2022-03-30]. ISSN 10241752. Dostupné z: doi:10.26480/jmerd.03.2019.35.46

[23] KIESGEN, Gerrit, Manfred KLÜTING, Christian BOCK a Hubert FISCHER. *The New 12-Cylinder Hydrogen Engine in the 7 Series: The H2 ICE Age Has Begun*. -. Dostupné z: doi:10.4271/2006-01-0431

[24] Ingnition lead sets parameters. In: *Tesla Blatná* [online]. [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: http://www.tesla-blatna.cz/en/products-ignition-lead-sets-parameters

[25] NGK CR3 Racing Cable Spark Plug Wire. In: *Amazon* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://www.amazon.com/NGK-CR3-Racing-Cable-Spark/dp/B0018JVNYY

[26] Spojka kabelu svíčky NGK. In: *RAWA: Zahradní a lesní technika* [online]. [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://www.rawa.cz/detail/spojka-kabelu-svicky-ngk-j-1ngk

[27] VERHELST, Sebastian a Thomas WALLNER. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009, **35**(6), 490-527. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2009.08.001

[28] MANTEY, Creighton, Arnaldo MEZZARANO a Alan KOLKEMO. Exhaust Valve & Valve Seat Insert – Development for an Industrial LPG Application. *SAE International Journal of Commercial Vehicles* [online]. 2009, **2**(2) [cit. 2022-02-15]. Dostupné z: doi:10.4271/2009-01-1602

[29] THIRUVALLUR LOGANATHAN, Balasubramanian, Duraikkannan ELUMALAI, Phaneesh KUMARASWAMY a V LAKSHMINARASIMHAN. *Durability Improvement of Cylinder Head in Alternate Fuel Engines* [online]. - [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: doi:10.4271/2018-32-0055

[30] RAUSCHER, Jaroslav. *VOZIDLOVÉ MOTORY*. Brno, 2004. STUDIJNÍ OPORY. Vysoké učení technické v Brně.

[31] Kolbenschmidt - Basic information: Valve seat inserts. In: *ČESOMOT: specialisté na motorové díly* [online]. [cit. 2022-04-23]. Dostupné z: https://www.cesomot.cz/files/tinymce/files/pdf%20katalogy/ks/sedla%20ventilu%20-%20materialy%20atd.pdf

[32] BENEŠ, Oldřich. *Opravy motorových vozidel*. 1. vyd. Praha: Práce, 1956.

[33] *Technologie oprav 1: Učebnice pro 2. a 3. ročník oboru Opravář zemědělských strojů*. 1. Nový Jičín: Střední škola technická a zemědělská, 2016. ISBN 978-80-88058-23-6.

[34] VLK, František. *Elektrická zařízení motorových vozidel*. 1. vydání. Brno: František Vlk, 2005. ISBN 80-239-3718-9.

[35] Ignition Coil P65-WS. In: *Bosch motorsport* [online]. [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://www.bosch-motorsport.com/content/downloads/Raceparts/en-GB/50454027208805259.html

[36] REIF, Konrad a Karl-Heinz DIETSCHE. *Automotive handbook*. 9th edition, revised and extended. Karlsruhe: Robert Bosch, 2014. ISBN 978-1-119-03294-6.

[37] VLK, František. *Automobilová technická příručka*. 1. vydání. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-9681-4.

[38] Spark plug - Construction & Technical Information. In: *NGK* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: https://www.ngksparkplugs.co.za/technical/technical-spark-plugs/

[39] Vše o zapalovacích svíčkách. In: *Autorevue* [online]. [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: https://www.autorevue.cz/Client.Gallery/show.aspx?id_file=621078975&article=38045

[40] VOJÁČEK, Antonín. Magnetické senzory přiblížení - 2. díl. In: *Automatizace* [online]. [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-priblizeni-2-dil.html

[41] VLČEK, Jiří. *Automatizace 3* [online]. In: . [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: https://www.tzb-info.cz/docu/texty/0001/000102_at3.pdf

[42] JAROSLAV, Koutný a Vlk IVO. Elektronika I učebnice: Součástky řízené neelektrickou veličinou. In: *ELUC* [online]. Olomouc, 2009 [cit. 2022-03-30]. Dostupné z: https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/612

[43] *GT-POWER - Gamma Technologies: Software Overview* [online]. In: . [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: https://www.gtisoft.com/gt-power/#section-1

[44] *LP11DA - Datasheet: Sensors for Engine Developmen* [online]. In: . [cit. 2022-05-31]. Dostupné z: https://www.avl.com/c/document_library/get_file?uuid=a7f39682-7b8c-41e7-9146-15b08b59904e&groupId=10138&download

[45] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů - 1. svazek*. 5. vydání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 80-03-00046-7.

[46] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost II*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-010-2375-3.

[47] *ALUPA: Mechanické a technologické vlastnosti nabízených slitin hliníku* [online]. In: . [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.https://www.alupa.cz/documents/ke-stazeni/normy-chemicke-slozeni-chemicke-vlastnosti-1508327516.pdf/documents/ke-stazeni/normy-chemicke-slozeni-chemicke-vlastnosti-1508327516.pdf

[48] *MatWeb: Aluminum 6063-T6* [online]. In: . [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=333b3a557aeb49b2b17266558e5d0dc0

[49] *MatWeb: Aluminum 6066-T6* [online]. In: . [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=2af4dd4c6d5740489dc5b342ef1ab84b

[50] NGK zapalovací fajfka - CR3. In: *Motořetězy* [online]. [cit. 2022-05-24]. Dostupné z: https://www.motoretezy.cz/cz/e-shop/1383810/c78681-fajfky-ngk/ngk-zapalovaci-fajfka-cr3.html

[51] *Proal: EN AW-6082 Vlastnosti* [online]. In: . [cit. 2022-05-23]. Dostupné z: https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-6082/

Seznam obrázků

Obr. 1 - Vývoj emisních norem Euro [2] *11*
Obr. 2 - Pokles emisí NOx. [8] *13*
Obr. 3 - Motor T3B-928-70 [16] *17*
Obr. 4 - Ottův cyklus [17] *18*
Obr. 5 - Detonační spalování [21] *20*
Obr. 6 - Popis součástí přestavby *22*
Obr. 7 - Kritické místo *23*
Obr. 8 - Umístění zapalovací svíčky *24*
Obr. 9 - Zapalovací kabel NGK CR-3 [25] *25*
Obr. 10 - Kabelová spojka [26] *25*
Obr. 11 - Vedení zapalovacího kabelu *26*
Obr. 12 - Návrh víka hlavy válců *27*
Obr. 13 - Součásti ventilového rozvodu [18] *28*
Obr. 14 - Zapalovací cívka Bosch [35] *30*
Obr. 15 - Konstrukce zapalovací svíčky [39] *32*
Obr. 16 - Tepelná hodnota svíčky [38] *33*
Obr. 17 - Princip funkce Hallova elementu [40] *34*
Obr. 18 - Průběhy výstupního signálu [41] *35*
Obr. 19 - Držák snímače klikové hřídele *36*
Obr. 20 - Víko se snímačem otáček *36*
Obr. 21 - Umístění snímače AVL LP11DA *37*
Obr. 22 – Umístění snímače AVL 12QP505cl *38*
Obr. 23 - Rozložení napětí [MPa] před úpravou *43*
Obr. 24 - Rozložení napětí [MPa] po úpravě *44*
Obr. 25 - Rozložení napětí [MPa] v ose ventilů *44*

Seznam tabulek

Tab. 1 – Porovnání paliv [15] *19*
Tab. 2 – Hodnoty pro výpočet tlaku ve spoji *42*

Seznam příloh

Příloha č.1 Detail návrhu úpravy hlavy válce

Příloha č.2 Zapalovací kabel NGK CR3 [50]

Příloha č.3 AVL LP11DA Datasheet [44]

Příloha č.4 Vlastnosti hliníkových slitin EN AW 6xxx [51]

Příloha č.5 Model sestavy hlavy válce: BP-01

Příloha č.6 Výkres sestavy hlavy válce: BP-01

Příloha č.7 Výrobní výkres víka hlavy válce: BP-01-01

Příloha č.8 Výrobní výkres úpravy hlavy válce: BP-01-02

Příloha č.9 Výrobní výkres ochranné trubky: BP-01-03

Příloha č.10 Výrobní výkres podložky pro zapalovací svíčku: BP-01-04

Příloha č.11 Výrobní výkres záslepky hlavy válce: BP-01-05

Příloha č.12 Model sestavy držáku snímače otáček klikové hřídele: BP-02

Příloha č.13 Výkres sestavy držáku snímače otáček klikové hřídele: BP-02

Příloha č.14 Výkres svařence držáku: BP-02-01

Příloha č.15 Výrobní výkres plechu snímače: BP-02-01-01

Příloha č.16 Výrobní výkres přípojného plechu k bloku motoru: BP-02-01-02

Příloha č.17 Model víka vačkové hřídele válce: BP-03

Příloha č.18 Výkres sestavy držáku snímače polohy vačkové hřídele: BP-03

Příloha č.19 Výrobní výkres víka vačkové hřídele válce: BP-03-01

Příloha č.20 Výrobní výkres spojovacího plechu: BP-03-02

Příloha č.21 Výrobní výkres snímacího kola: BP-03-03

Příloha č.22 Pevnostní analýza úpravy hlavy válce - nastavení

Příloha č.23 Seznam nakupovaných součástí

Seznam příloh na CD

Příloha č.5 Model sestavy hlavy válce: BP-01

Název souboru: HLAVA_VALCE_SESTAVA_CELEK.asm

Příloha č.6 Výkres sestavy hlavy válce: BP-01

Název souboru: HLAVA _VALCU_SESTAVA_BP-01.pdf

Příloha č.7 Výrobní výkres víka hlavy válce: BP-01-01

Název souboru: VIKO_VYROBNI_BP-01-01.pdf

Příloha č.8 Výrobní výkres úpravy hlavy válce: BP-01-02

Název souboru: HLAVA_VALCE_VYROBNI_BP-01-02.pdf

Příloha č.9 Výrobní výkres ochranné trubky: BP-01-03

Název souboru: TRUBKA_VYROBNI_BP-01-03.pdf

Příloha č.10 Výrobní výkres podložky pro zapalovací svíčku: BP-01-04

Název souboru: PODLOZKA_VYROBNI_BP-01-04.pdf

Příloha č.11 Výrobní výkres záslepky hlavy válce: BP-01-05

Název souboru: ZASLEPKA_VYROBNI_BP-01-05.pdf

Příloha č.12 Model sestavy držáku snímače otáček klikové hřídele: BP-02

Název souboru: SNIMANI_KLIKOVA_HRIDEL_SESTAVA.asm

Příloha č.13 Výkres sestavy držáku snímače otáček klikové hřídele: BP-02

Název souboru: SESTAVA_KLIKOVA_HRIDEL_BP-02.pdf

Příloha č.14 Výkres svařence držáku: BP-02-01

Název souboru: SVARENEC_BP-02-01.pdf

Příloha č.15 Výrobní výkres plechu snímače: BP-02-01-01

Název souboru: PLECH_SNIMACE_BP-02-01-01.pdf

Příloha č.16 Výrobní výkres přípojného plechu k bloku motoru: BP-02-01-02

Název souboru: PLECH_PRIPOJNY_BP-02-01-02.pdf

Příloha č.17 Model víka vačkové hřídele válce: BP-03

Název souboru: SNIMANI_VACKOVA_HRIDEL_SESTAVA.asm

Příloha č.18 Výkres sestavy držáku snímače polohy vačkové hřídele: BP-03

Název souboru: SESTAVA_VACKOVA_HRIDEL_BP-03.pdf

Příloha č.19 Výrobní výkres víka vačkové hřídele válce: BP-03-01

Název souboru: VIKO_VACKOVE_HRIDELE_BP-03-01.pdf

Příloha č.20 Výrobní výkres spojovacího plechu: BP-03-02

Název souboru: SPOJOVACI_PLECH_BP-03-02.pdf

Příloha č.21 Výrobní výkres snímacího kola: BP-03-03

Název souboru: SNIMACI_KOLO_BP-03-03.pdf

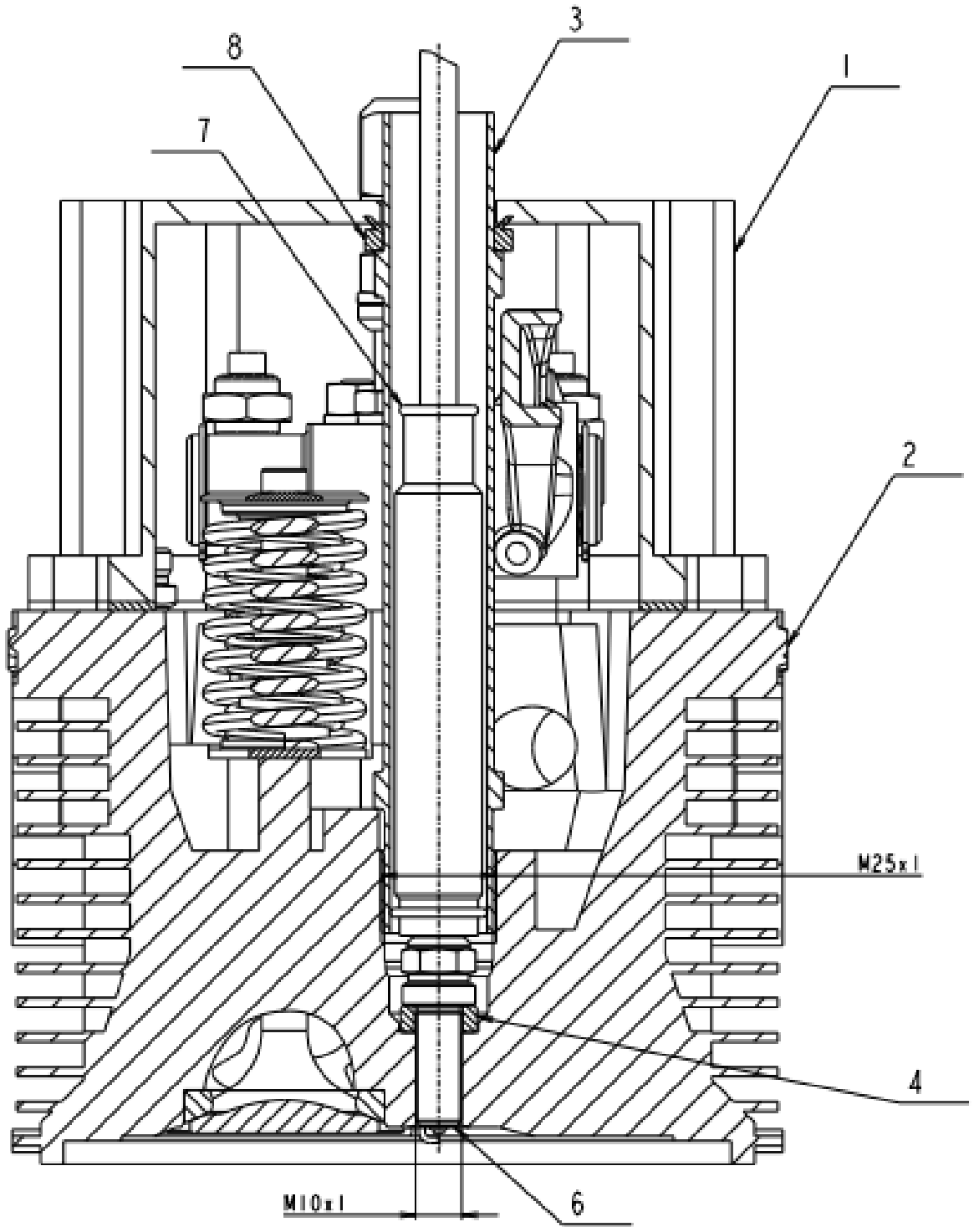
Příloha č.22 Pevnostní analýza úpravy hlavy válce - nastavení

Název souboru: HLAVA_VALCE_NASTAVENI.prt

Příloha č.23 Seznam nakupovaných součástí

Název souboru: PREHLED_SOUCASTI.xlsx

Příloha 1 – Detail návrhu úpravy hlavy válce



Příloha č.2 - Zapalovací kabel NGK CR3 [50]

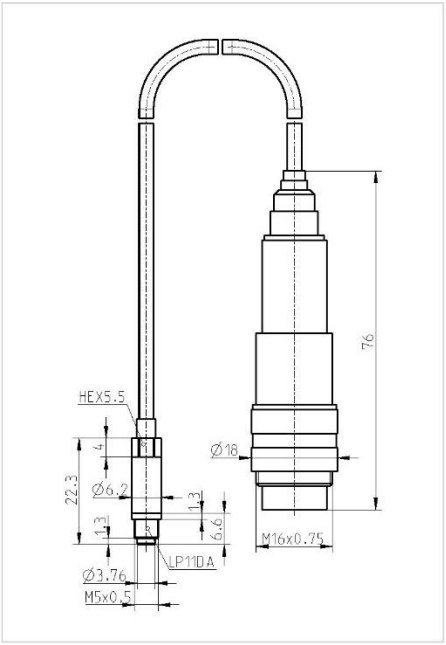
Type	Stock No.	Colour	R [kΩ]	Threat Ø [mm]	Terminal
CR3		red	5	10 - 12	

Rubber sheated

Příloha č.3 - AVL LP11DA Datasheet [44]

Pressure Sensors // Sensors for Engine Development

LP11DA



Scope of Supply

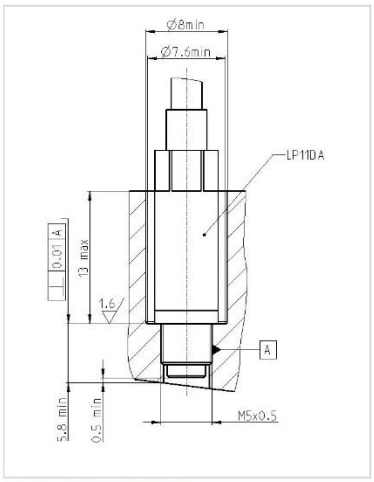
- Sensor LP11DA with cable and integrated amplifier
- Gasket SG11
- Connection cable CY10
- Protection caps
- Calibration sheet
- Documentation

The M5 low pressure indicating sensor LP11DA measures the absolute pressure in the intake or exhaust manifold of combustion engines. The sensor is available in different versions with the pressure ranges of 2, 5, 10 and 30 bar. This piezoresistive sensor is used for precise measurement of static and dynamic pressure variations. Typical applications are gas-exchange analysis, precise friction analysis or turbo charger development. For measurements in the exhaust manifold a cooling adapter is necessary. The sensor is equipped with an integrated amplifier featuring thermal compensation.

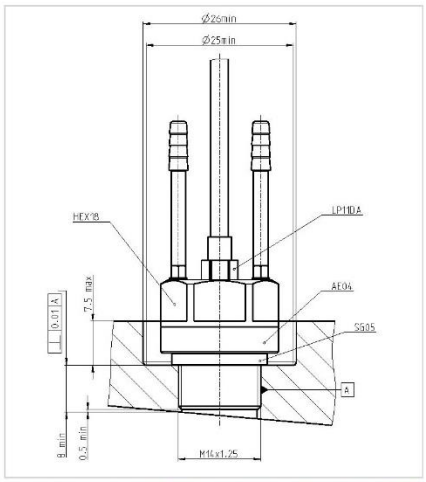
Type	Art. No.	Pressure range
LP11DA02	TIEZ1050A.01	0 ... 2 bar
LP11DA05	TIEZ1053A.01	0 ... 5 bar
LP11DA10	TIEZ0784A.01	0 ... 10 bar
LP11DA30	TIEZ1054A.01	0 ... 30 bar

Specifications

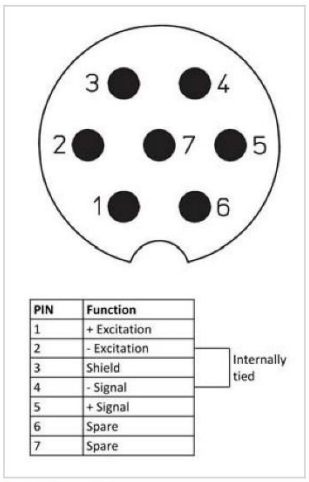
Measuring range			0 ... 2, 5, 10, 30 bar	
Overload			4, 10, 20, 60 bar	
Sensitivity				
▪ LP11DA02	≤		4900 mV/bar	
▪ LP11DA05	≤		1960 mV/bar	
▪ LP11DA10	≤		930 mV/bar	
▪ LP11DA30	≤		327 mV/bar	
Linearity	≤	±	0.1%	FSO
Frequency response	>		50 kHz	
Operating temperature range			-55 ... 232 °C	
Compensated temperature range			-20 ... 200 °C	
Thread diameter			M5x0.5	
Weight			15 grams	Sensor only
Mounting torque			4 Nm	
Amplifier output			0.2 ... 9.5 V	±150 mV
Power supply			24 ± 4 V DC	



Direct installation of LP11DA



Low pressure sensor LP11DA mounted into cooling adaptor AE04



Pin assignment

Accessories		
Measurement cable extension	CS10 (5 m) CS11 (10 m)	Art.No. TILPCS10A.01 Art.No. TILPCS11A.01
Power supply and cables	PY10 (y-cable for multiple supply) PS10 (power supply 24 V)	Art.No. TILPYS10A.01 Art.No. TILPPS10A.01
Gasket	SG11	Art.No. TIBQ0242A.01
Dummy	DL01	Art.No. TIDL01A.01
Adapters	AI01 (mounting adapter) AE04 (cooling adapter)	Art.No. TILPIA01A.01 Art.No. TILPEA01A.01
Mounting tool	TT29	Art.No. TIWG0371A.01
Mounting paste	SF01	Art.No. TIHK0094A.01
Cooling system	ZP91.00 (115 V version) ZP91.00 (230 V version)	Art.No. TIZP91A.14 Art.No. TIZP91A.04

Mechanické a technologické vlastnosti nabízených slitin hliníku

Označení dle EN AW	Označení dle	Chemické složení	Stav materiálu	Pevnost v tahu Rm (Mpa)	Mez kluzu min. Rp (Mpa)	Tažnost A% min.	Vhodnost k eloxu	Korozní	Svařitelnost	Obrobitelnost
	Označení dle	Chemické složení	Stav materiálu		Mez kluzu min. Rp (Mpa)	Tažnost A% min.	Vhodnost k eloxu	Korozní odolnost	Svařitelnost	Obrobitelnost
1050A	42 4005	Al99,5	0/H111	65-95	20	20	velmi dobrá	velmi dobrá	velni dobrá	špatná
			H24	105-145	75	4				
2007	42 4254	AlCu4PbMgMn	T4511	330-370	210	8	špatná	špatná	špatná	velmi dobrá
2011		AlCu6BiPb	T3	min. 320	270	8	špatná	špatná	špatná	velmi dobrá
2017A	42 4201	AlCu4Mg	T4	min. 360	240	10	přijatelná	přijatelná	přijatelná	dobrá
2024	42 4203	AlCU4Mg1	T351	min. 400	270	8	špatná	přijatelná	špatná	velmi dobrá
5083	42 4415	AlMg4,5Mn0,7 / AlMg5	H111	min. 270	110	12	přijatelná	velmi dobrá	velmi dobrá	dobrá
5754	42 4413	AlMg3	0/H111	180-250	80	17	dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	dobrá
			H114	190-260	80	15				
			H22	220-270	130	9				
			H24	240-280	160	8				
6005A	42 4401	AlSiMg(A)	T6	min. 260	215	8	dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	dobrá
6060	42 4401	AlMgSi	T4	min. 120	60	16	velmi dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	přijatelná
			T6	190	150	8				
			T64	min. 180	120	12				
			T66	min. 215	160	8				
6063	42 4401	AlMg0,7Si	T4	min. 130	65	12	dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá	dobrá
			T6	min. 200	170	8				
			T66	min. 245	200	8				
6082	42 4400	Al Si1MgMn	T4	min. 205	110	14	dobrá	velmi dobrá	dobrá	dobrá
			T6	min. 290	240	8				
			T651	min. 300	240	4				++
6101B	–	EAlMgSi(B)	T7	min. 170	120	12	–	–	–	špatná
7075	–	AlZn5,5MgCu	T651	min. 470	400	6	špatná	přijatelná	špatná	velmi dobrá