

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



Bakalářská práce

Konstrukční řešení měření indikovaného tlaku ve válci
motocyklového motoru formule SAE

Vypracoval: Jiří Formánek

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vít Doleček Ph.D.

Rok: 2017

Zadání



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Formánek** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **439129**
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:

Konstrukční řešení měření indikovaného tlaku ve válci motocyklového motoru formule SAE

Název bakalářské práce anglicky:

Design of In-cylinder Pressure Measurement of Motorcycle Engine Used in Formula SAE

Pokyny pro vypracování:

Na základě rešerše existujících řešení uspořádání měření indikovaného tlaku ve válci motoru, vyberte nejvhodnější variantu pro motor Yamaha YZF R6. Vypracujte konstrukční řešení zástavby snímače tlaku ve válci a polohy klikové hřídele daného motoru.

Seznam doporučené literatury:

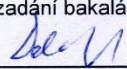
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

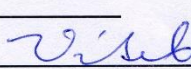
Ing. Vít Doleček Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

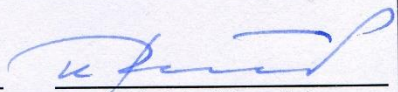
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **12.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

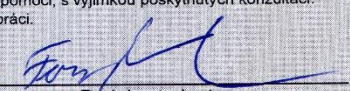

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


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.

15.5.2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „měření indikovaného tlaku ve válci motocyklového motoru formule SAE“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitolu této práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

Jiří Formánek

Anotace

Jméno autora:	Jiří Formánek
Název bakalářské práce:	Konstrukční řešení měření indikovaného tlaku ve válci motocyklového motoru formule SAE
Akademický rok:	2016/2017
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor:	Bez oboru
Ústav:	12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel
Vedoucí práce:	Ing. Vít Doleček Ph.D.
Klíčová slova:	Indikace, snímače tlaku, inkrementální snímače
Abstrakt:	Tématem této bakalářské práce je rešerše uspořádání měření indikovaného tlaku ve válci motoru Yamaha YZF-R6 13S. Návrh zástavby zvolených snímačů tlaku a snímače polohy klikové hřídele.
Počet stran:	33
Počet obrázků:	25
Počet příloh:	9

Annotation

Author:	Jiří Formánek
Title:	Design of In-cylinder Pressure Measurement of Motorcycle Engine Used in Formula SAE
Academic year:	2016/2017
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Study programme:	B2342 Theoretical Fundamentals of Mechanical Engineering
Specialization:	No specialization
Department:	12120 – Department of Automobiles, Internal Combustion Engines and Railway Vehicles
Supervisor:	Ing. Vít Doleček Ph.D.
Keywords:	Indication, pressure sensors, incremental sensors
Abstract:	The subject of this bachelor thesis is a research of arrangement of an indicated pressure measurement in the Yamaha YZF-R6 13S engine. Design of an installation of selected pressure sensors and crankshaft position sensor.
Number of pages:	33
Number of pictures:	25
Number of attachments:	9

Poděkování

Děkuji Ing. Vítu Dolečkovi Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, konzultace a cenné připomínky při jejím zpracování.

Poděkování patří zajisté mé rodině, která mě podporovala po celou dobu studia. Dále děkuji členům týmu CTU CarTech za veškerou pomoc.

Obsah

1	Úvod.....	10
1.1	Formula Student/SAE	10
1.2	Dosavadní stav	11
1.3	Cíl práce.....	11
2	Snímače tlaku	11
2.1	Piezelektrické senzory.....	11
2.1.1	Svíčka s piezelektrickým snímačem	13
2.1.2	Nechlazený vysokoteplotní piezelektrický snímač tlaku	13
2.1.3	Vodou chlazený piezelektrický snímač tlaku	14
2.2	Optické snímače tlaku	15
2.2.1	Zapalovací svíčka s integrovaným optickým snímačem tlaku	15
2.2.2	Těsnění pod hlavu s integrovaným optickým snímačem tlaku.....	16
3	Volba vhodného snímače tlaku	17
4	Zástavba zvoleného snímače	22
4.1	Navrhovaný výrobní postup.....	23
5	Snímače polohy klikové hřídele	24
5.1	Impulzní snímače.....	25
5.1.1	Indukční snímač	25
5.1.2	Magnetoelektrické snímače.....	25
5.1.3	Optické snímače.....	26
5.2	Analogové snímače	27
5.2.1	Bezkontaktní magnetický snímač otáček.....	27
6	Volba snímače polohy a zástavba.....	28
7	Závěr	31
8	Použité zdroje	32

Seznam obrázků

Obr. 1 – Indikátorový diagram podle Nikolause Augusta Otta z roku 1876 [1]	10
Obr. 2 – Teplotní závislost piezoelektrické konstanty d_{11} pro křemen a fosforečnan gallitý [1]	12
Obr. 3 – Zapalovací svíčka s piezoelektrickým snímačem Kistler 6113C [3].....	13
Obr. 4 – Kistler 6052C [4]	14
Obr. 5 – Piezoelektrický snímač Kistler 6052C v montážním pouzdře [4]	14
Obr. 6 – Piezoelektrický vodou chlazený snímač Kistler 6041B [5]	14
Obr. 7 – Schéma optického snímače tlaku Optrand [6].....	15
Obr. 8 – Zapalovací svíčka se zabudovaným optickým snímačem tlaku[7].....	16
Obr. 9 – Těsnění pod hlavu se zabudovanými optickými snímači indikovaného tlaku Optrand[6]	16
Obr. 10 – Detail místa měření indikovaného tlaku [6].....	16
Obr. 11 – Spalovací prostor hlavy motoru Yamaha YZF-R6.....	17
Obr. 12 – Schéma hlavy motoru Yamaha YZF-R6	18
Obr. 13 – Řez hlavou motoru- čtvrtý válec	18
Obr. 14 – Scan řezu hlavou motoru- čtvrtý válec	18
Obr. 15 – 3D scanner Romer Absolute Arm 7-Axis.....	19
Obr. 16 – Uložení montážního pouzdra chlazeného piezoelektrického snímače Kistler 6041B s patrnou kolizí s ventilovým sedlem	20
Obr. 17– Návrh uložení montážního pouzdra piezoelektrického snímače Kistler 6052C	20
Obr. 18 – Řez uložení zvoleného snímače v hlavě motoru s přivařeným hliníkovým segmentem	23
Obr. 19 – Poloha navrtání hlavy motoru pro montážní pouzdro tlakového snímače	24
Obr. 20 – Schéma indukčního snímače [9]	25
Obr. 21 – Magnetoelektrický snímač otáček [8].....	26
Obr. 22 – Optický snímač úhlu natočení klikové hřídele AVL 365C.....	27
Obr. 23 - Bezkontaktní magnetický snímač otáček RM08 společnosti RLS [11].....	27
Obr. 24 – Řez sestavou propojení snímače úhlu natočení klikové hřídele s klikovou hřídelí varianta 1	29

Obr. 25 – Řez sestavou propojení snímače úhlu natočení klikové hřídele s klikovou hřídelí varianta 2 30

Seznam příloh:

1. Tabulka: Přehled základních vlastností uvažovaných snímačů
2. Uložení snímače tlaku_FS09-17-033-02-001
3. Návarek_FS09-17-033-02-002
4. kusovník_FS09-17-033-02-001
5. Uchycení snímače otacek_FS09-17-033-01-001
6. Propojovací šroub_FS09-17-033-01-002
7. Domeček gufera_FS09-17-033-01-003
8. kusovník_FS09-17-033-01-001
9. Al_20mm_Navarek_FS09-17-033-02-002

Seznam použitých zkratek:

ε	[1]	Kompresní poměr
t	[°C]	Teplota
d_{11}	[pC·N ⁻¹]	Piezoelektrická konstanta
p	[Pa]	Tlak
a	[m·s ⁻²]	Zrychlení

1 Úvod

Měření indikovaného tlaku spalovacích motorů je staré jako jejich samotný vývoj. Již v roce 1876 Nikolaus August Otto zaznamenal mechanickým indikátorem průběh tlaku ve spalovací komoře Ottova motoru. Tento okamžik se považuje jako začátek historického vývoje tlakové indikace.



Obr. 1 – Indikátorový diagram podle Nikolause Augusta Otta z roku 1876 [1]

Měření tlaku se od té doby stále rozvíjí a jejím hlavním smyslem je získání vstupních dat pro tvorbu prediktivního modelu spalování například v programu GT Power. Následné simulace pomohou doladit parametry motoru podle požadavků daných aplikací motoru. Výsledkem jsou pak úpravy motoru, které jsou navrženy za nižší cenu a kratší čas než experimentálními metodami.

1.1 Formula Student/SAE

Formula Student je soutěž založená v roce 1978. Cílem projektu je připravit studenty technických škol pro praxi. Soutěž je založená na myšlence takzvané fiktivní firmy, která poptává návrh a výrobu 1000 kusů formulových vozů pro neprofesionální závodníky. Samotný závod se dělí na statické a dynamické disciplíny. Celkové pořadí se tak dělá z osmi disciplín, kde jsou zohledněny parametry formule i vědomosti jejich tvůrců.

V soutěži se účastní více než 500 týmů z celého světa a tým CTU CarTech je aktuálně (21. 6. 2017) na 20. místě [2].

1.2 Dosavadní stav

V rámci disciplíny EDR (Engineering Design Report) jsme nuceni na závodech dokazovat, že rozumíme našemu prototypu formule a také musíme obhájit naši koncepční volbu včetně všech provedených úprav. Doposud jsme provedli mnoho úprav, které vedly ke zlepšení průběhu momentu a spotřeby paliva. Tyto úpravy jsou výsledkem simulací, ovšem tyto simulace nejsou příliš prezentovatelné, jelikož moc neseď s experimentálně zjištěnou momentovou charakteristikou. Vzhledem k tomu, že prezentované výstupy ze simulací v disciplíně EDR mají mnohem větší váhu než změřené hodnoty, jsme nuceni tyto simulace stále zpřesňovat. K tomu by mělo přispět nové přesnější změření indikovaného tlaku na formulovém motoru Yamaha YZF-R6 s aktuálními úpravami.

1.3 Cíl práce

Navrhnout vhodný snímač pro měření indikovaného tlaku s ohledem na jeho zástavbu, kvalitu měření a jeho dostupnost. Vyřešit zástavbu snímače tlaku. Zvolit vhodný snímač polohy klikové hřídele a vyřešit jeho zástavbu.

2 Snímače tlaku

2.1 Piezoelektrické senzory

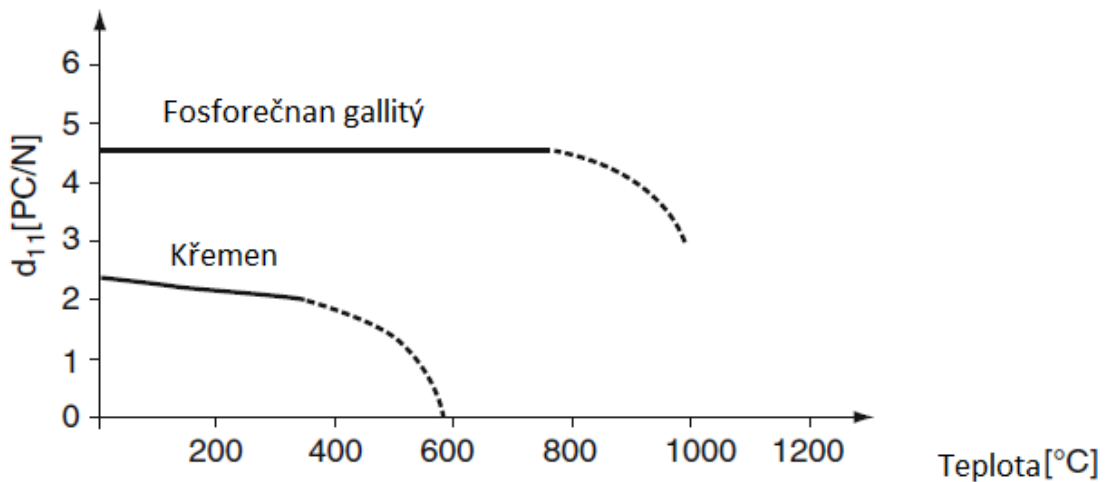
Pro měření indikovaného tlaku se nejčastěji používají piezoelektrické senzory, které fungují na principu jistých krystalů, které vytvářejí nebo absorbují náboj za mechanického namáhání. Je to tedy aktivní prvek, kde je náboj proporcionální měřenému tlaku.

Materiál krystalů musí mít následující vlastnosti:

- odolnost vysokým teplotám a zároveň měřená veličina na teplotě nesmí záviset
- Vysokou piezoelektrickou citlivost, která závisí na symetrii krystalů
- Vysokou mechanickou tuhost a pevnost
- Vysoký odpor izolace
- Dlouhodobou stabilitu těchto vlastností

- Nízká cena materiálů a jejich dobrá obrobiteľnosť

Dosažení těchto parametrů není jednoduché. Konvenční materiál pro piezoelektrické tlakové snímače je krystal křemene (SiO_2). Struktura křemene je stabilní až do teploty 573°C , ale závislost piezoelektrických vlastností na teplotě se skokově zvětší okolo 300°C . Tento jev dobře vyjadřuje závislost piezoelektrické konstanty d_{11} na teplotě (viz Obr. 2). Proto lze používat snímače z křemene jen do teplot $200\text{--}250^\circ\text{C}$, což je podmíněno chlazením snímače, nebo dobrým odvodem tepla.

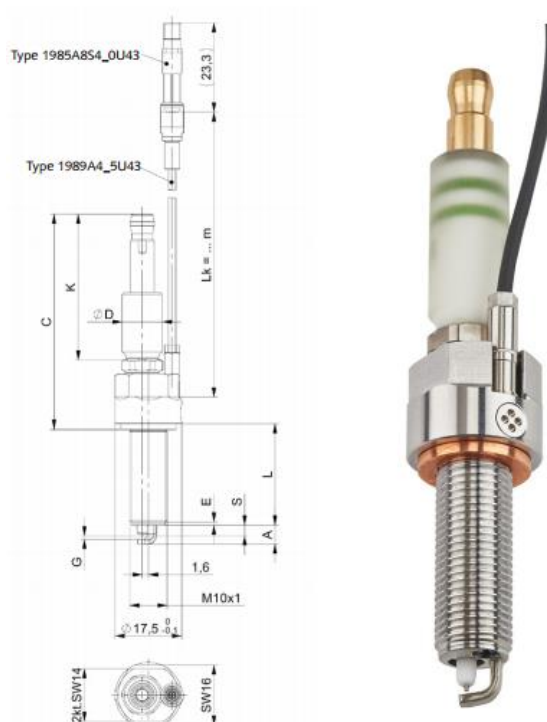


Obr. 2 – Teplotní závislost piezoelektrické konstanty d_{11} pro křemen a fosforečnan gallitý [1]

Dále se používá Fosforečnan gallitý (GaPO_4) vyvinutý speciálně pro účely vysokoteplotních snímačů. Vyznačuje se vysokou piezoelektrickou citlivostí, která je z velké části nezávislá na teplotě. Lze tak snímač používat až do teploty 350°C . Přitom citlivost snímače ve srovnání s křemenem je asi dvakrát větší. Fosforečnan gallitý se tak používá hlavně pro nechlazené snímače. [1]

2.1.1 Svíčka s piezoelektrickým snímačem

Piezoelektrické snímače tlaku integrované do zapalovací svíčky mají velkou výhodu v jednoduchosti zástavby a jejich aplikace je velmi častá tam, kde nelze použít samostatný snímač tlaku ze zástavbových důvodů. Pro tuto aplikaci se nepoužívá křemíkový krystal, ale již zmíněný GaPO_4 . Konstrukce svíčky je patrná z Obr. 3, kde je střední elektroda svíčky mimo osu, vznikne tak malý prostor pro miniaturní piezoelektrický snímač. Citlivost těchto snímačů se pohybuje okolo $10 \text{ pC} \cdot \text{bar}^{-1}$, odolává teplotě až do 350°C [4]



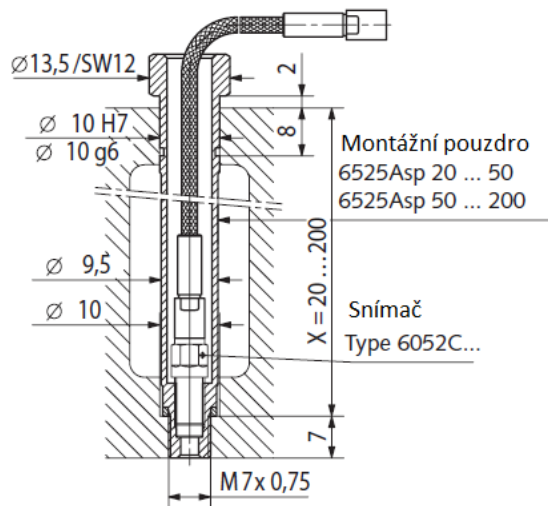
Obr. 3 – Zapalovací svíčka s piezoelektrickým snímačem Kistler 6113C [3]

2.1.2 Nechlazený vysokoteplotní piezoelektrický snímač tlaku

Samostatný snímač tlaku je podobné konstrukce jako již zmíněný integrovaný snímač tlaku do zapalovací svíčky. Jeho hlavní předností je kompromis kompaktnosti a citlivosti, která se pohybuje okolo $20 \text{ pC} \cdot \text{bar}^{-1}$. Dále se vyznačuje dobrou teplotní stabilitou citlivosti a dobrou životností. Aplikace těchto snímačů se řeší navrtáním hlavy motoru, často přes vodní okruh chlazení. Chladicí okruh se zatěsňuje pomocí montážního pouzdra, což je de facto trubička zašroubovaná do stěny spalovací komory hlavy (viz. Obr. 4). Montážní pouzdro je dodáváno s požadovaným rozměrem se snímačem. [4]



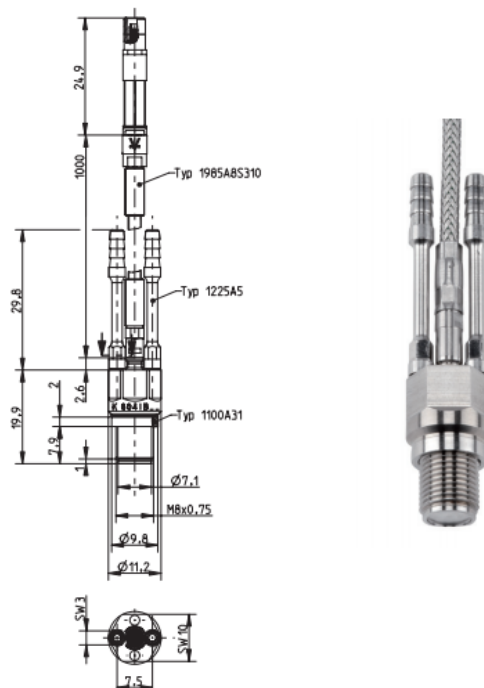
Obr. 4 – Kistler 6052C [4]



Obr. 5 – Piezoelektrický snímač Kistler 6052C v montážním pouzdře [4]

2.1.3 Vodou chlazený piezoelektrický snímač tlaku

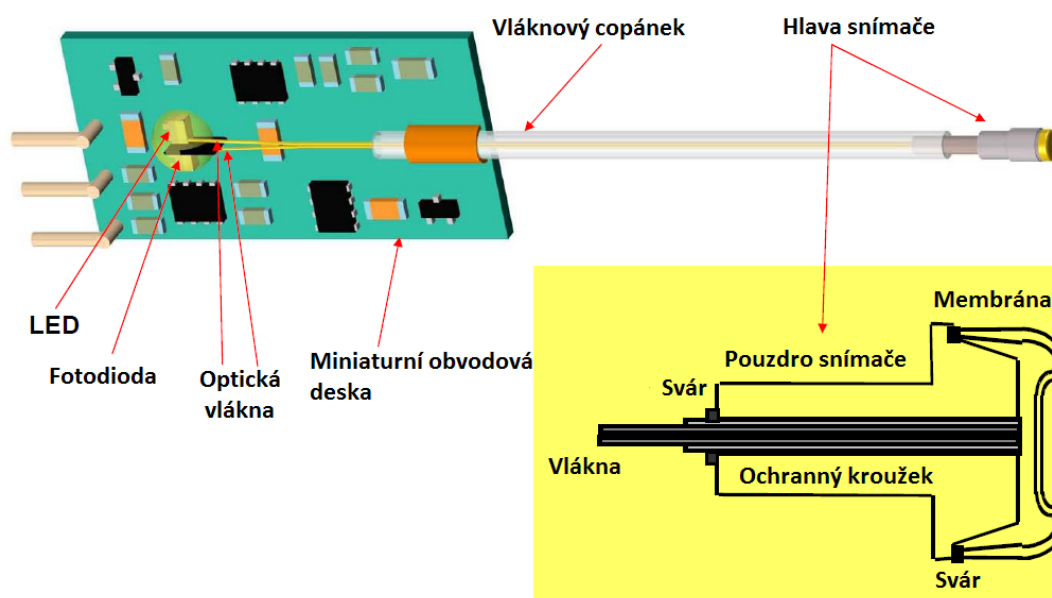
Vodou chlazené snímače jsou nejcitlivější (okolo $40 \text{ pC} \cdot \text{bar}^{-1}$), nejméně ovlivněné teplotou a nejodolnější. Jejich aplikace je ovšem možná pouze pro velké motory, nebo motory s přebytkem místa na hlavě. Další nevýhodou pak je velká citlivost na zrychlení způsobené například ventilovým rozvodem. [5]



Obr. 6 – Piezoelektrický vodou chlazený snímač Kistler 6041B [5]

2.2 Optické snímače tlaku

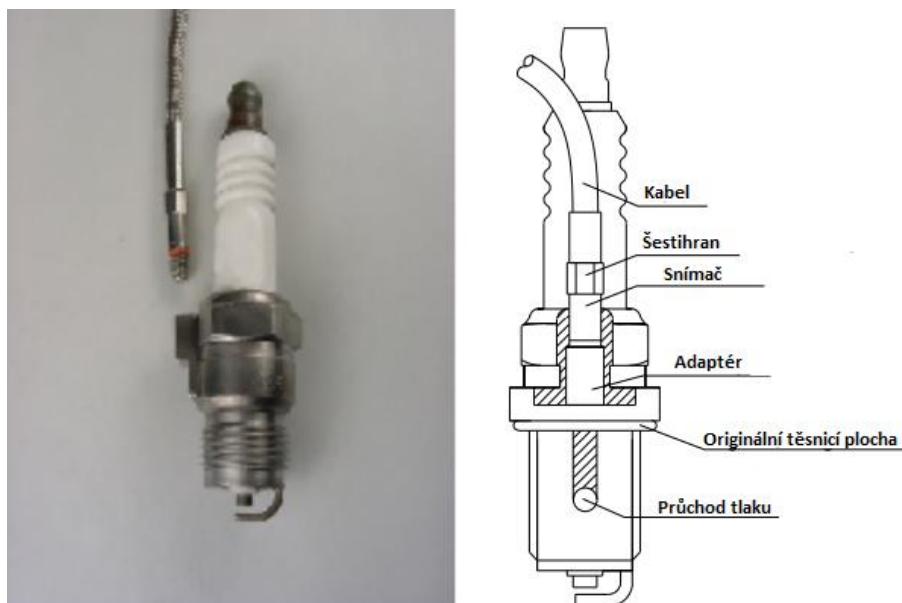
Optické snímače tlaku firmy Oprand fungují na principu změny intenzity světla odraženého od Inconelové membrány vychylované za působení tlaku. Přednostmi snímačů tohoto typu jsou dlouhá životnost a nižší cena oproti piezoelektrickým snímačům. [6]



Obr. 7 – Schéma optického snímače tlaku Oprand [6]

2.2.1 Zapalovací svíčka s integrovaným optickým snímačem tlaku

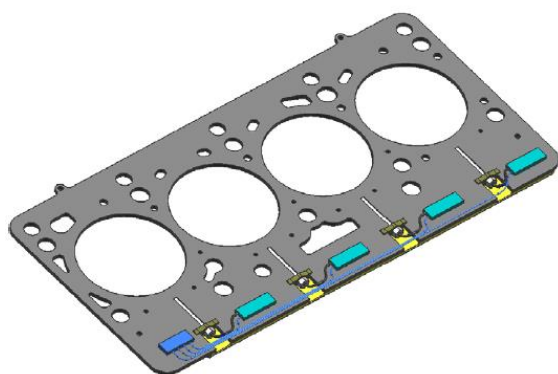
Svíčka je obdobné konstrukce jako u již zmíněném piezoelektrickém senzoru integrovaném do svíčky s tím rozdílem, že snímač tlaku je optický. Výhody tohoto snímače jsou opět v jednoduchosti instalace. Nevýhodou je menší maximální pracovní teplota oproti piezoelektrické svíčce. Přesnost se pohybuje $\pm 1 - 2\%$ [7].



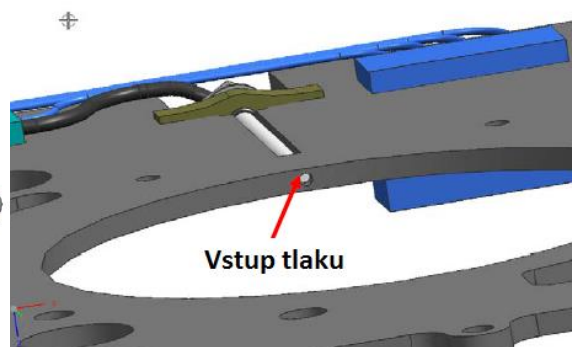
Obr. 8 – Zapalovací svíčka se zabudovaným optickým snímačem tlaku [7]

2.2.2 Těsnění pod hlavu s integrovaným optickým snímačem tlaku

Použití optického snímače tlaku integrovaného do těsnění pod hlavu motoru se jeví jako velmi výhodná metoda měření z hlediska nenáročnosti instalace a výhodné polohy na okraji válce, kde se dá dobře analyzovat také klepání motoru.



Obr. 9 – Těsnění pod hlavu se zabudovanými optickými snímači indikovaného tlaku Optrand [6]



Obr. 10 – Detail místa měření indikovaného tlaku [6]

3 Volba vhodného snímače tlaku

Při volbě typu snímače pro motor formule student Yamaha YZF-R6 jsem zohlednil základní parametry snímačů a hlavně zástavbové možnosti, které u tak malého motoru jsou problematické.

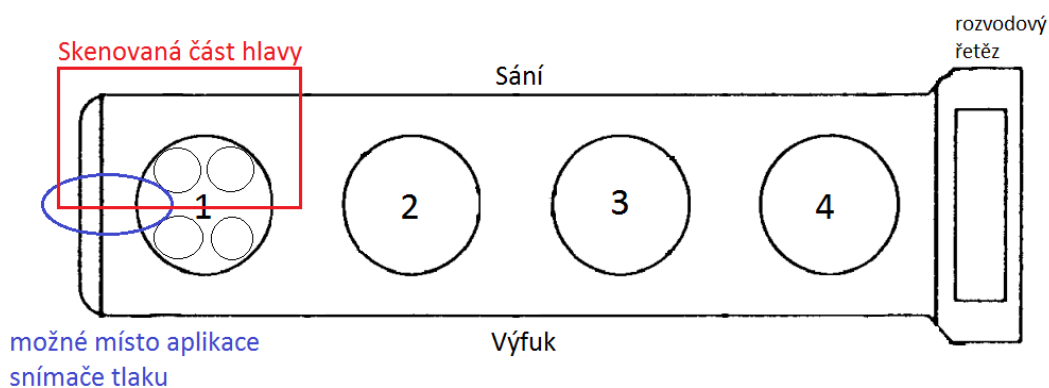


Obr. 11 – Spalovací prostor hlavy motoru Yamaha YZF-R6

Jako první variantu jsem vyloučil těsnění pod hlavu s integrovaným optickým snímačem. Aktuálně používáme slabé těsnění pod hlavu o tloušťce 0,45mm za účelem zvýšení kompresního poměru. Kdybychom použili měřicí těsnění o tloušťce 2,5mm, změnili bychom zásadně kompresní poměr ε z 13,7:1 na 8,25:1 a měření by tak neodpovídalo provozním parametrům motoru. Tato změna by se musela kompenzovat snížením bloku motoru, nebo změnou kompresní výšky pístu. Obojí je ale neproveditelné na motoru, kde píst v horní úvratí je zároveň s okrajem válce. Dalším problémem by byla dostupnost takového těsnění, společnost Oprtrand sice prezentuje, že takové těsnění umí vyrobit, ovšem nikde ho nenabízí.

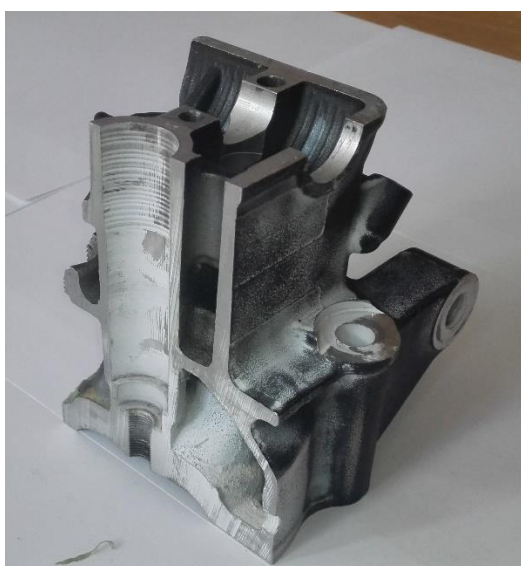
Z hlediska teplotního namáhání snímače by byla nejlepší poloha mezi sacími ventilovými sedly. V této poloze by ale montážní pouzdro zasahovalo do sacího kanálu. Aby snímač nezasahoval do sacího kanálu, bylo by nutné snímač více „položít“ k rovině

dosedací plochy hlavy motoru. V tomto případě by snímač zasahoval do sacích ventilových sedel. Po vyloučení všech nerealizovatelných míst pro navrtání hlavy, zbývá instalace pouze ze stran na prvním nebo čtvrtém válci viz Obr. 12. Poloha na čtvrtém válci je nevhodná z důvodu řetězového vačkového rozvodu. Zbývá tak jediná poloha, a to na prvním válci.

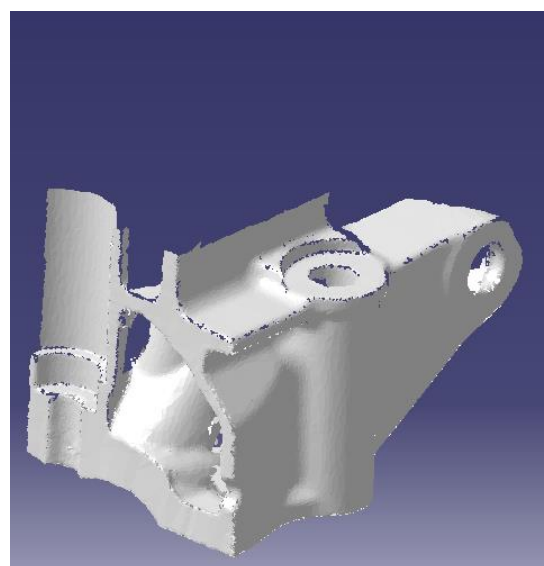


Obr. 12 – Schéma hlavy motoru Yamaha YZF-R6

Pro zkoumání tvaru hlavy jsem použil poškozenou a následně rozřezanou část, ze které jsem vytvořil 3D scan pomocí scanneru Romer Absolute Arm 7-Axis (Obr. 15) ve firmě SOR Libchavy spol. s r.o. Následně jsem ve 3D modeláři hledal nejlepší možné umístění snímače vhodné pro navrtání.



Obr. 13 – Řez hlavou motoru- čtvrtý válec

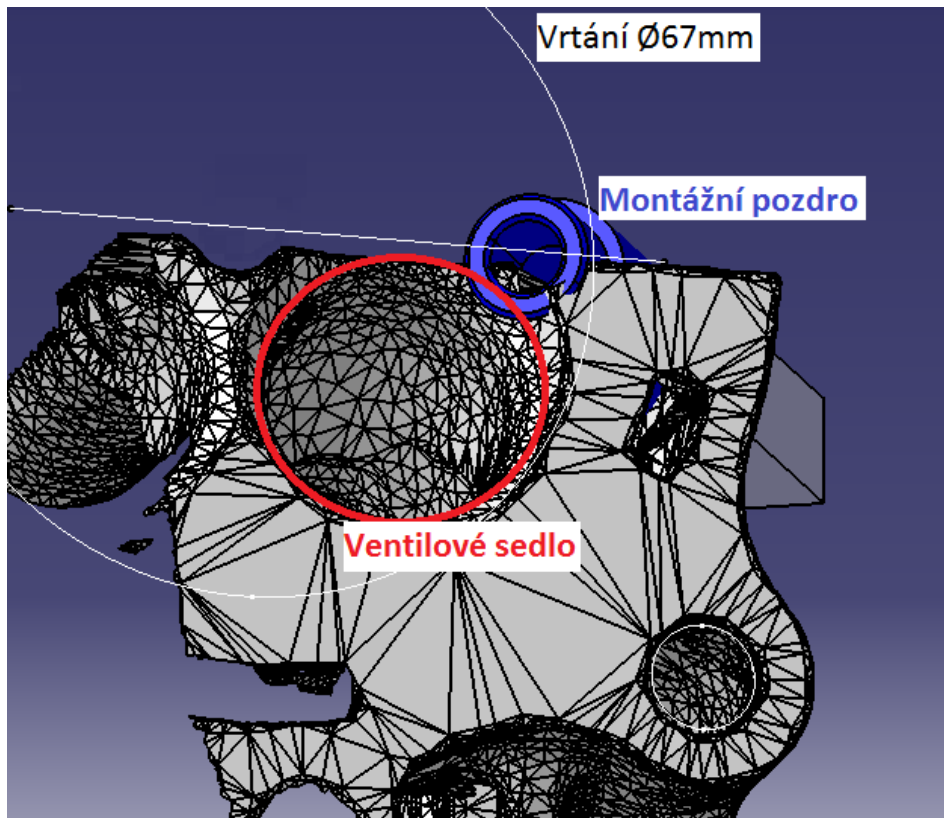


Obr. 14 – Scan řezu hlavou motoru- čtvrtý válec

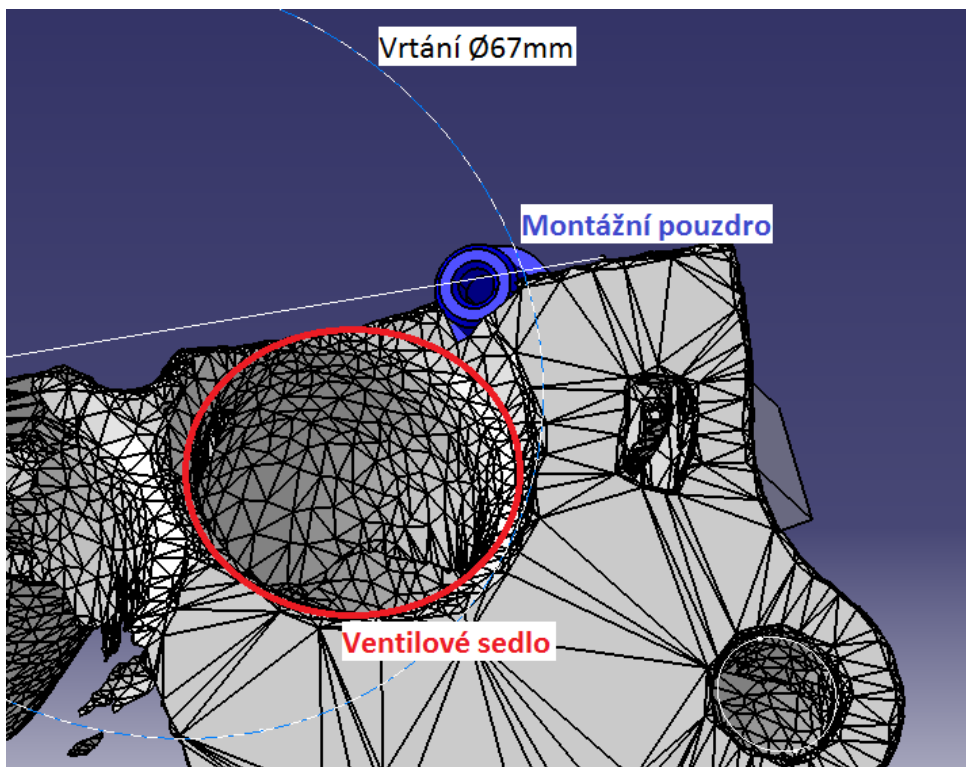


Obr. 15 – 3D scanner Romer Absolute Arm 7-Axis

Ze zástavbových důvodů bohužel není možné použít piezoelektrický chlazený snímač díky jeho velikosti. Nejmenší snímač na trhu je Kistler 6041B se závitem M8. Protože ke stěně spalovacího prostoru se nedá dostat jinak než přes vodní okruh, bylo by nutné použít montážní pouzdro, které by vodní okruh zatěsnilo. Montážní pouzdro by bylo zašroubované do stěny spalovací komory závitem M12x1,25. Jak je patrné z 3D studie (Obr. 16), montážní pouzdro by zasahovalo do ventilového sedla.



Obr. 16 – Uložení montážního pouzdra chlazeného piezoelektrického snímače Kistler 6041B s patrnou kolizí s ventilovým sedlem



Obr. 17 – Návrh uložení montážního pouzdra piezoelektrického snímače Kistler 6052C

Nechlazený piezoelektrický snímač je možné umístit do již zmíněného místa (Obr. 17) na prvním válci, aniž by zasahoval do ventilových sedel. Oproti chlazenému snímači má menší průměr závitů montážní vložky, a to M7x0,75.

	Piezoelektrická měřicí svíčka Kistler 6113C	Piezoelektrický chlazený snímač Kistler 6041B	Piezoelektrický nechlazený snímač Kistler 6052C	Optická měřicí svíčka Optrand PSiplug	Těsnění pod hlavu s optickým snímačem Optrand
Přesnost	±3%	±1%	±2%	± 1 – 2%	± 1 – 2%
Citlivost	10 pC · bar ⁻¹	40 pC · bar ⁻¹	20 pC · bar ⁻¹	-	-
Nelinearita	± 0,5%	±0,3%	±0,4%	± 0,2%	± 0,2%
Citlivost na zrychlení	0,000001 bar · g ⁻¹	0,01 bar · g ⁻¹	0,0005 bar · g ⁻¹	-	-
Maximální teplota	350°C	400°C (nechlazený)	400°C	300°C	380°C
Životnost	- (kratší)	- (dlouhá)	- (normální)	0,5-5*10 ¹²	0,5-5*10 ¹²
Aplikace	snadná	nereálná	reálná	snadná	nereálná
Dostupnost	1ks	0ks	2ks	0ks	0ks

Tab. 1 – Přehled základních vlastností uvažovaných snímačů

Zbývají tedy jen tři možné varianty měření indikovaného tlaku na motoru Yamaha YZF-R6, a to nechlazený piezoelektrický snímač a měřicí zapalovací svíčky (piezoelektrické/ optické), které jsou nejsnazší volbou pro měření.

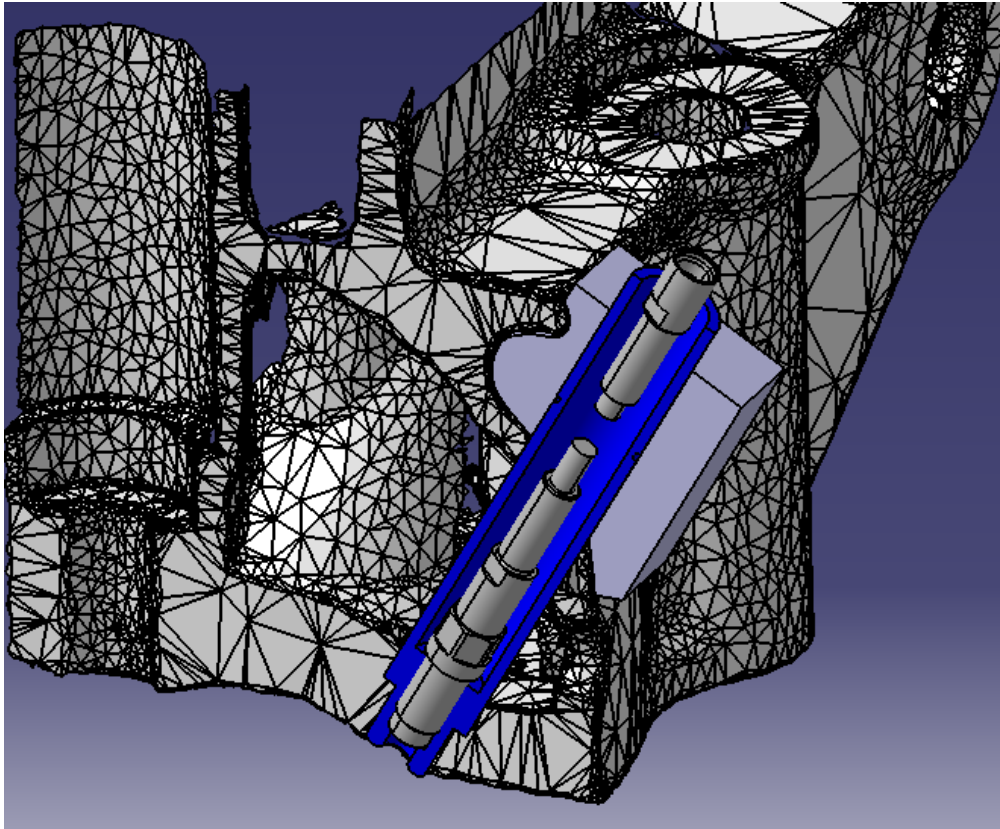
Pro měření na formulovém motoru Yamaha YZF-R6 jsem zvolil, jako nejvhodnější variantu, nechlazený piezoelektrický snímač indikovaného tlaku Kistler 6052C. Tento snímač je navržen pro účely měření víceválcových malých motocyklových motorů a závodních motorů s extrémními vibracemi [4]. Má dvakrát větší citlivost, lepší přesnost a teplotní odolnost než piezoelektrická zapalovací měřicí svíčka. Velkou výhodou je umístění snímače na okraji válce, kde je předpoklad vzniku klepání a tím i daleko lepší

detekce patrná z průběhu tlaku, než u měřicí zapalovací svíčky. Nevýhodou je pouze aplikace, která se neobejde bez navrtání hlavy v jediném možném místě zástavby.

Při volbě snímače jsem uvažoval vliv zrychlení způsobené ventilovým rozvodem na měřený náboj piezoelektrického krystalu snímače. Z dokumentace snímačů [3,4,5] je patrné, že čím větší citlivost (větší krystal) má snímač, tím má zrychlení způsobené mechanickým pohybem motoru negativnější vliv na měření indikovaného tlaku. Dále jsem uvažoval v jaké ose snímače je krystal nejvíce náchylný na zrychlení. Podle dokumentace zvoleného snímače [4] je tato citlivost o 250% větší v radiální ose než v axiální. Proto jsem se snažil snímač umístit co nejvíce do osy ventilů.

4 Zástavba zvoleného snímače

Zvolený piezoelektrický nechlazený snímač Kistler 6052C se instaluje do navrtané hlavy motoru v montážním pouzdru s koncovým závitem M7x0,75. Funkční těsnicí plochy jsou dvě, osazení nad závitem pro utěsnění spalovacího prostoru měděným těsnicím kroužkem a na opačné straně válcová plocha pro utěsnění vodního chladícího okruhu gumovým O-kroužkem. Jelikož vnější stěna hlavy při zvoleném průniku montážního pouzdra není kolmá na osu pouzdra a tloušťka stěny hlavy je 4mm, není možné bez dalších úprav utěsnit vodní okruh. K dispozici máme montážní pouzdro, které bylo navrženo pro měření jiného motoru. Vzdálenost dosedací plochy pouzdra a drážky pro O-kroužek je 38 mm, což je mimo odlitek hlavy motoru. Je tedy nutné přivařit k hlavě hliníkový návarek, skrz který bude provedeno vrtání. Montážní pouzdro bude tak utěsněno v hliníkovém návarku (Příloha 3,9) viz Obr. 18.

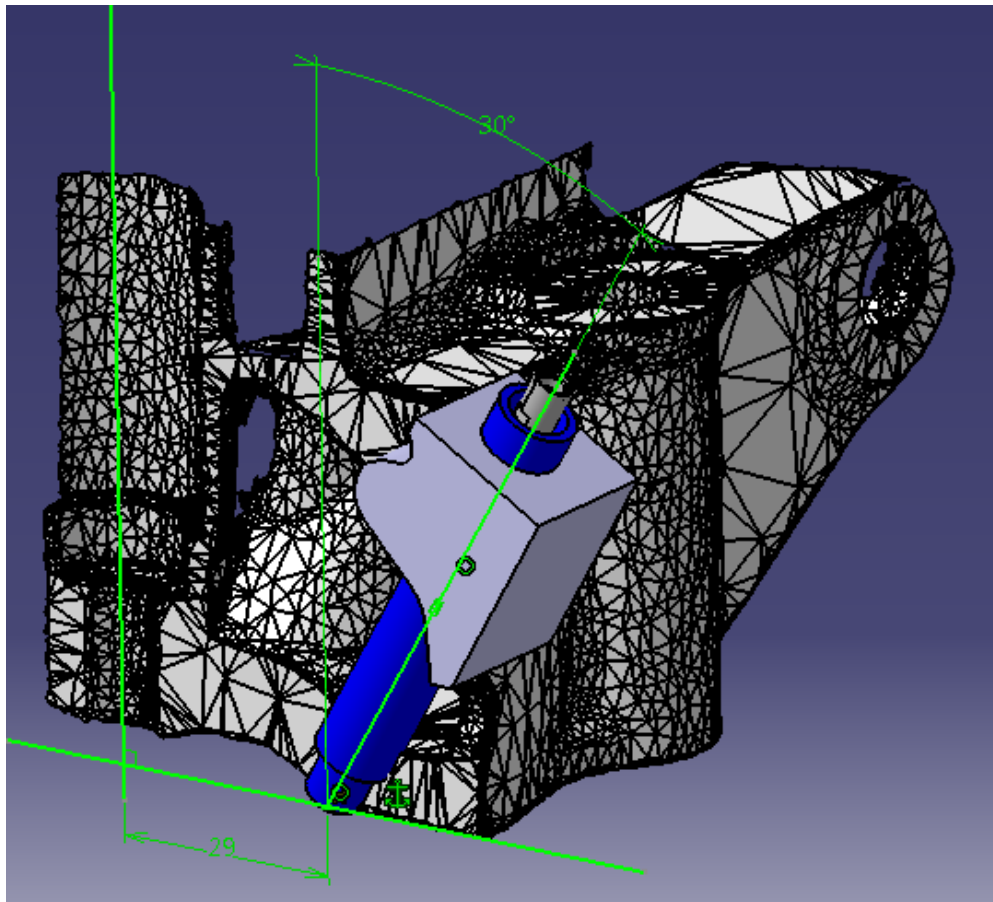


Obr. 18 – Řez uložením zvoleného snímače v hlavě motoru s přivařeným hliníkovým návarkem

4.1 Navrhovaný výrobní postup

Vrtání bude provedeno pod úhlem 30° od kolmice na dosedací plochu hlavy (viz 2. příloha). Pro přesné určení polohy, aby nedošlo k narušení ventilových sedel, doporučuji provést:

1. předvrtání ze strany spalovacího prostoru vrtákem $\varnothing 6$ mm
2. provést vrtání z druhé strany speciálním stupňovitým vrtákem $\varnothing 6,2$ mm a $\varnothing 9,8$ mm
3. Vyřezat závit M7x0,75. Provést dokončení těsnicí plochy pro O-kroužek výstružníkem $\varnothing 10$ H7 (viz Obr. 5).



Obr. 19 – Poloha navrtání hlavy motoru pro montážní pouzdro tlakového snímače

5 Snímače polohy klikové hřídele

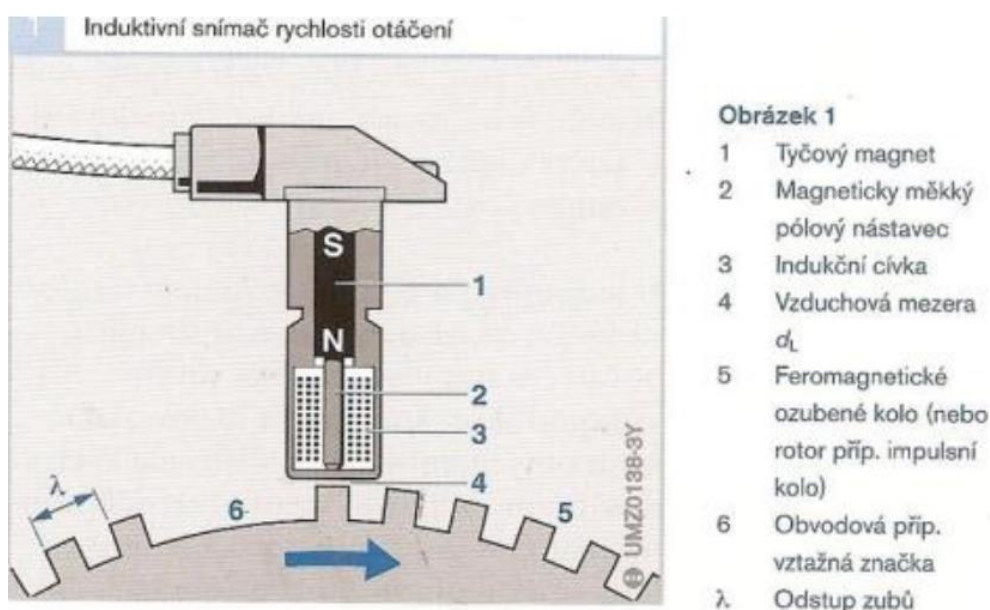
Snímače otáček se dají rozdělit na dvě základní skupiny, a to na analogové a impulzní. Výstupem analogových snímačů je například napětí, které je přímo úměrné frekvenci otáčení, což je pro snímání polohy klikové hřídele nepoužitelné. Nebo také existují magnetické analogové snímače, jejichž výstupem je sinusový signál. Z analogového snímače můžeme zjistit přesné přírůstkové (inkrementální) hodnoty úhlu natočení měřené součásti pouze u sinusového výstupu. Příkladem může být bezkontaktní magnetický snímač.

Impulzní snímače mají výstupní signál ve formě impulzů, ze kterých lze zjistit přesná poloha během jedné otáčky. Poloha rotačních součástí se obvykle snímá indukčními, Hallovými a optickými snímači.

5.1 Impulzní snímače

5.1.1 Indukční snímač

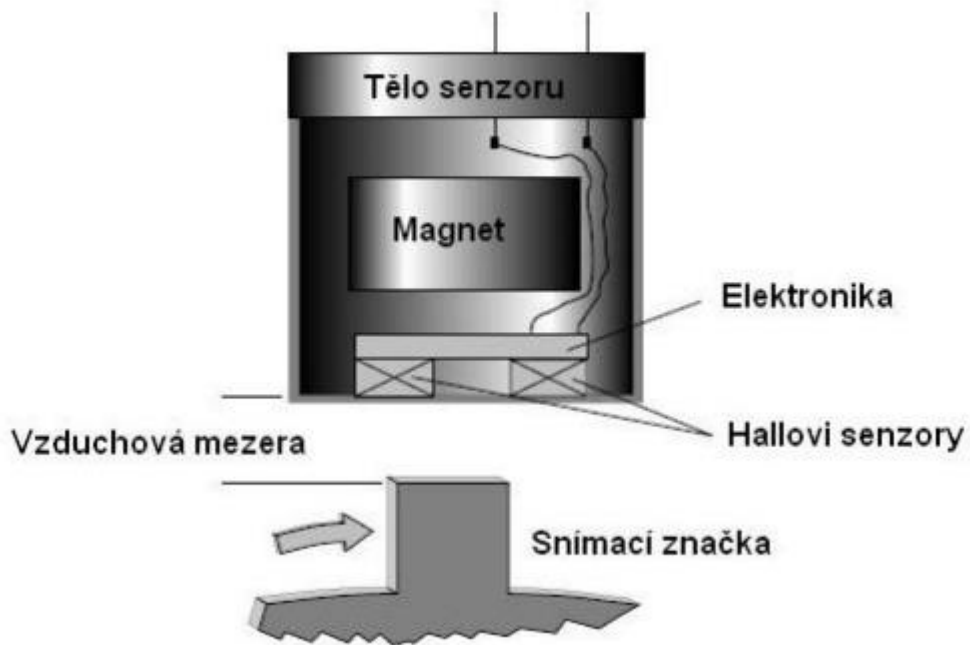
Indukční snímač se používá hlavně pro měření otáček a polohy klikové hřídele pro řídicí jednotku motoru, která například u zážehového motoru určuje předstih zapálení směsi. Snímač se většinou skládá z tyčového magnetu a cívky. Kolem snímače se otáčí feromagnetické ozubené kolo a na cívce se indukuje napětí. Pro přesné měření úhlu natočení klikové hřídele se tento snímač nehodí z důvodu jeho malé citlivosti, značnému kolísání indukovaného napětí v závislosti na otáčkách a případnému rušení napěťového signálu.



Obr. 20 – Schéma indukčního snímače [9]

5.1.2 Magnetoelektrické snímače

Tyto snímače fungují na principu Hallova jevu, což představuje vznik měřeného napětí v polovodičové destičce za působení magnetického pole. Magnetoelektrické snímače se často používají pro zjištění polohy vačkové hřídele pro řídicí jednotku, která vyhodnotí, zdali je daný válec „ve stříhu“ a zapalovací svíčka by zapalovala zbytečně, nebo je válec v kompresi. Méně často se používá pro měření otáček klikové hřídele. Výhodou Hallova snímače oproti indukčnímu je, že se zvyšujícími otáčkami se mění pouze frekvence signálu, nikoliv jeho amplituda. Dále dokáže sledovat otáčky blížící se nule, to ovšem nemá pro naši aplikaci význam. Nevýhodou je rušení poměrně malého výstupního napětí signálu a měření vyšších otáček, kdy snímač „nestíhá“ zaznamenávat.



Obr. 21 – Magnetoelektrický snímač otáček [8]

5.1.3 Optické snímače

Optické snímání otáček se realizuje pomocí rotující měřené části. Princip fungování spočívá v clonění světelného toku mezi zdrojem světla a fotodetektořem, který zaznamenává impulzy. Clonění je realizováno pomocí kotoučku nebo mezikruží, které je rozděleno na světlo-propustné a světlo-nepropustné úseky. Při otáčení se pak tyto části střídají a přerušují světelný tok. Hlavními výhodami optických snímačů je jejich malá velikost a současně vysoká citlivost, nenáchylnost k rušení signálu a také možnost měření vysokých otáček až $20\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Nevýhodou je náchylnost k vniknutí znečišťujících látek jako olej, špína apod.



Obr. 22 – Optický snímač úhlu natočení klikové hřídele AVL 365C

5.2 Analogové snímače

5.2.1 Bezkontaktní magnetický snímač otáček

Snímač se skládá z magneticky citlivého prvku umístěného v pouzdru klasického indukčního snímače a permanentního magnetu. Princip spočívá v reakci magneticky citlivého prvku na změnu magnetického toku generovaného permanentním magnetem připevněným na rotoru. Snímání probíhá přes vzduchovou mezeru. [10] Výstupem je sinusový signál. Velkou výhodou je jednoduchost instalace a možnost práce i ve značně znečištěném prostředí (např. v oleji). Maximální otáčky jsou až $30\,000\text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a přesnost $\pm 0,3^\circ$. [11]



Obr. 23 - Bezkontaktní magnetický snímač otáček RM08 společnosti RLS [11]

6 Volba snímače polohy a zástavba

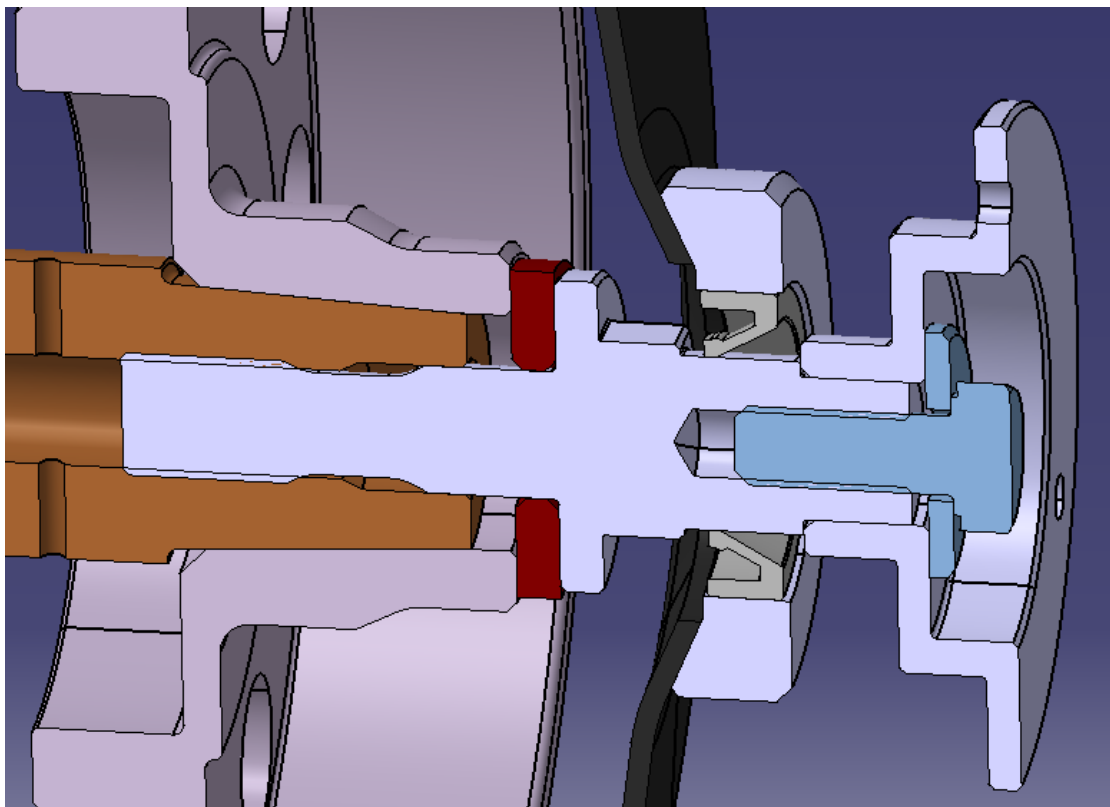
Přesná a běžně používaná varianta měření úhlu natočení klikové hřídele je optickým snímačem. Z dostupných typů se pro aplikaci na motocyklový motor hodí pouze ty varianty, které nemají značkový disk připevněný na setrvačnicku či řemenici klikové hřídele, protože motocyklový motor Yamaha YZF-R6 má celý setrvačnicku uvnitř motoru a smáčený olejem. Olej by takové měření znemožnil. Vhodný je proto typ 365C od společnosti AVL. Jedná se o uzavřený snímač určený pro pevné spojení s klikovou hřídelí. Další velmi přesnou a pro zástavbu jednoduchou variantou, která stojí za uvažování, je bezkontaktní magnetický snímač RM08 od firmy RLS [11]. Přesností je srovnatelný s optickými snímači. Nevýhodou je náchylnost k rušení napěťového signálu o amplitudě 1,6V.

Protože měření indikovaného tlaku bude probíhat na prvním válci, je vhodné, aby měření úhlu natočení klikové hřídele bylo provedeno co nejbližší měřenému válci. Do měření může totiž zasahovat vliv torzního namáhání klikové hřídele od dalších válců, vznikne tak chyba, která může ovlivnit výsledek měření. Z těchto důvodů jsem zvolil měření ze strany alternátoru.

Vybral jsem variantu optického snímače 365C o AVL a to z několika důvodů. Prvními důvody jsou dostatečná přesnost, spolehlivost a dostupnost. Dalšími důvody, proč jsem vybral zástavbově složitější optický snímač a ne bezkontaktní magnetický, je ve zpracování výstupního signálu. K měření indikovaného tlaku a zároveň k měření úhlu natočení klikové hřídele používáme měřící ústřednu KiBox of firmy Kistler, která bohužel neumí zpracovat signál z bezkontaktního snímače RM08. Dále se domnívám, že by docházelo k rušení samotného měření setrvačnickem, který je osazen silnými magnety a je v bezprostřední blízkosti snímače.

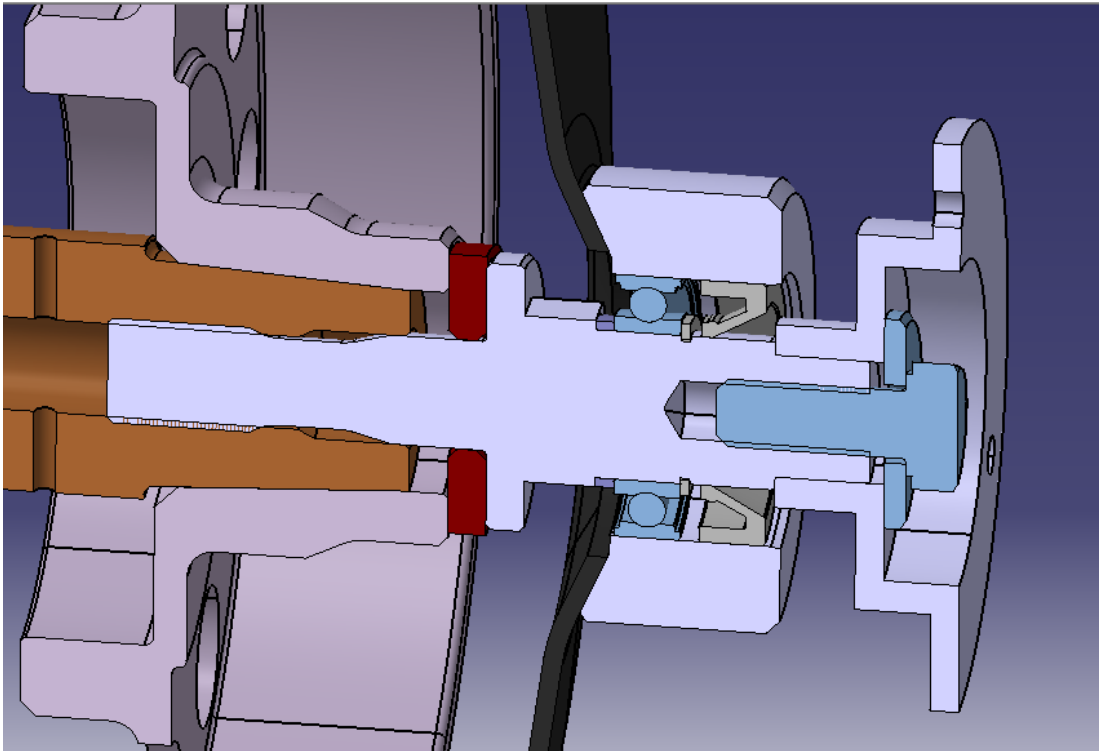
Spojení snímače s klikovou hřídelí navrhuji pomocí speciálního prodlouženého šroubu, který přitahuje setrvačnicku ke klikové hřídeli a zároveň pokračuje skrz víko ke snímači otáček (viz Obr. 24,25; Příloha 5).

- 1. varianta Speciální šroub je pouze utěsněn guferem ve víku alternátoru. Domeček (Příloha 7.) ukládající gufero je po vycentrování šroubu (Příloha 6.) utažením přilepen k hořčíkovému víku lepidlem Loctite 9466 [12]. Na konci speciálního šroubu je opět osazení pro nalisování příruby, ke které je připevněn inkrementální snímač.



Obr. 24 – Řez sestavou propojení snímače úhlu natočení klikové hřídele s klikovou hřídelí varianta 1

- 2. Varianta Speciální šroub je uložen kuličkovým ložiskem a utěsněn guferem ve víku alternátoru. Domeček ukládající ložisko a gufero je po vycentrování šroubu utažením přilepen k hořčíkovému víku lepidlem Loctite 9466 [12]. Na konci speciálního šroubu je osazení pro nalisování příruby, ke které je připevněn rotor inkrementálního snímače.



Obr. 25 – Řez sestavou propojení snímače úhlu natočení klikové hřídele s klikovou hřídelí varianta 2

Pro zástavbu jsem vybral variantu 1, protože šroub má dostatečný průměr nato, aby unesl snímač otáček AVL 365C o hmotnosti 340g bez znatelné deformace. Dalším důvodem, proč nepoužít vodicí ložisko je problematické uložení domečku, které se špatně uchycuje ke slabému hořčíkovému víku. Výsledné uložení by bylo nedostatečně tuhé, složité a špatně rozebíratelné. Nevýhodou je tedy pouze větší riziko průsaku oleje kolem gufera z důvodu lehkého házení a pravděpodobně větší házení snímače. Snímač AVL 365C je však robustní konstrukce a lehké házení je kompenzováno ramínkem úchytu snímače.

7 Závěr

Z existujících řešení měření indikovaného tlaku jsem vybral pro formulový motor Yamaha YZF-R6 jako nejvhodnější piezoelektrický nechlazený snímač Kistler 6052C. Zástavba tohoto snímače je možná pouze v jednom místě hlavy motoru s použitím montážního pouzdra. Protože měření indikovaného tlaku bude provedeno na prvním válci, měření úhlu natočení klikové hřídele bude provedeno ze stejné strany motoru. Pro měření úhlu natočení klikové hřídele jsem vybral jako nejvhodnější variantu optický snímač AVL 365C. Konstrukční řešení zástavby snímače řeší propojení klikové hřídele s optickým snímačem speciálním šroubem.

Pro další vývoj bych doporučil při samotném měření indikovaného tlaku přímo porovnat měřící zapalovací svíčku se samostatným nechlazeným snímačem z hlediska přesnosti měření, tak i z hlediska citlivosti na detekci klepání motoru.

8 Použité zdroje

1. MERKER, Günter P., Christian SCHWARZ a Rüdiger. TEICHMANN. Combustion engines development: mixture formation, combustion, emissions and simulation. ISBN 978-3-642-02951-6.
2. Formula Student Combustion - World Ranking List [online]. Fs-Mazur, 2017. [cit. 20. 6. 2017] Dostupné z: <http://mazur-events.de/fs-world/C/>
3. M10x1 Measuring Spark Plug [online]. [cit 12. 6. 2017]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=64517&model=document&callee=frontend>
4. High-Temperature Pressure Sensor [online]. [cit 12. 6. 2017]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=52693>
5. Watercooled PiezoStar® Pressure Sensor [online]. [cit 13. 6. 2017]. Dostupné z: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=62718&model=document&callee=frontend>
6. Cylinder Head Gasket with Integrated Combustion Pressure Sensors [online]. [cit 15. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.optrand.com/Papers/DEER2010.pdf>
7. Pressure Measuring Spark Plug and Sensor [online]. [cit 15. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.optrand.com>
8. VLIV EXTERNÍCH ELEKTROMAGNETICKÝCH POLÍ NA FUNKCI SNÍMAČŮ OTÁČEK [online]. [cit 16. 6. 2017]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=14936
9. Snímače otáček [online]. [cit 17. 6. 2017]. Dostupné z: http://www.sps-vitkovice.cz/texty/texty/AUE/AUE_snimace_spalovacich_motoru_JAM.pdf
10. Magnetické snímače otáček [online]. [cit 17. 6. 2017]. Dostupné z: <http://www.ajptech.cz/produkty/prumyslova-automatizace/baumer-senzory/snimace/magneticke-snimace/>
11. RM08 SUPER SMALL NON-CONTACT ROTARY ENCODER [online]. [cit 17. 6. 2017]. Dostupné z: <https://www.rls.si/products/rotary-magnetic-encoders/rm08-super-small-non-contact-rotary-encoder>

12. LOCTITE® EA 9466™[online]. [cit 17. 6. 2017]. Dostupné z:
[http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209466-](http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209466-CS?pid=EA%209466&format=MTR&subformat=REAC&language=CS&plant=WE)
[CS?pid=EA%209466&format=MTR&subformat=REAC&language=CS&plant=WE](http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/EA%209466-CS?pid=EA%209466&format=MTR&subformat=REAC&language=CS&plant=WE)
RCS