



# Iniciace zážehu směsi zapalovací svíčkou

## Disertační práce

*Studijní program:* P2302 – Stroje a zařízení  
*Studijní obor:* 2302V010 – Konstrukce strojů a zařízení  
*Autor práce:* **Ing. Aleš Dittrich, Ing.Paed.IGIP**  
*Školitel:* doc. Ing. Josef Laurin, CSc.





# Ignition initiation of Mixture by Spark Plug

## Dissertation

*Study programme:* P2302 – Machines and Equipment  
*Study branch:* 2302V010 – Machines and Equipment Design  
*Author:* **Ing. Aleš Dittrich, Ing.Paed.IGIP**  
*Supervisor:* doc. Ing. Josef Laurin, CSc.





## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

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

Datum:

Podpis:

## Abstrakt

Disertační práce se zabývá problematikou iniciace zážehu směsi zapalovací svíčkou u zážehových spalovacích motorů. Pozornost je věnována popisu problematiky počátečních podmínek ve válci zážehového motoru v okamžiku před přeskokem jiskry mezi elektrodami zapalovací svíčky. Podstatná část práce je následně věnována experimentálnímu výzkumu a měření na vozidlovém zážehovém motoru s využitím dostupné (a v práci popsané) techniky, kterými disponují laboratoře Katedry vozidel a motorů na TUL.

Cílem disertační práce je výzkum průběhu spalování palivovzdušné směsi v zážehovém motoru.

## Abstract

The dissertation deals with the ignition spark ignition engines. Attention is paid to the description of the initial conditions in the engine of the spark-ignition engine at the moment before the spark overflow between the spark plug electrodes. A substantial part of the work is then devoted to experimental research and measurement on a vehicle petrol engine using the available (and in the work described) technique, which the laboratories of the Department of Vehicles and Engines have at TUL.

The aim of the dissertation is to investigate the course of combustion of the prepared fuel-air mixture in the spark-ignition engine.

## Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat mému školiteli doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za inspiraci k doktorskému studiu, za vedení celého mého doktorského studia a mnohé konzultace a připomínky při zpracování disertační práce. Dále bych chtěl velmi poděkovat prof. Ing. Stanislavu Berounovi, CSc. za podrobné konstruktivní připomínky k práci a příjemnou spolupráci jak při řešení pracovních úkolů, tak při zpracování disertační práce. Kolegům z Katedry vozidel a motorů patří dík za pomoc a podporu s experimenty v laboratoři KVM.

Zvláštní poděkování patří rodině za dlouholetou podporu při studiu a především pak manželce Ivaně a synovi Jonášovi za trpělivost při bádání, přemýšlení, zpracovávání výsledků a tvorbě této práce.

# Obsah

Seznam zkratk a symbolů . . . . .	8
<b>1 Úvod</b>	<b>11</b>
<b>2 Přehled o současném stavu problematiky</b>	<b>14</b>
2.1 Spalovací proces ve válci motoru . . . . .	14
2.1.1 Zážeh palivovzdušné směsi . . . . .	14
2.1.2 Ionizace plynů a ionizační proud . . . . .	18
2.1.3 Variabilita parametrů spalovacího procesu a pracovního oběhu PSM . . . . .	20
2.2 Zapalovací svíčka . . . . .	21
2.2.1 Přeskokové napětí, elektrodová vzdálenost . . . . .	23
2.2.2 Vedení tepla, tepelná hodnota zapalovací svíčky . . . . .	24
2.3 Zapalovací systémy zážehových spalovacích motorů . . . . .	27
2.3.1 Plně elektronické bezkontaktní bateriové zapalování . . . . .	28
2.3.2 Vysokofrekvenční zapalování . . . . .	31
2.3.3 Laserové zapalování . . . . .	33
2.4 Komůrkový zážeh . . . . .	35
2.4.1 Mahle - Turbulent Jet Ignition . . . . .	35
2.4.2 MWM GmbH . . . . .	39
2.4.3 Komůrkový zážeh ČVUT . . . . .	40
2.4.4 Zapalovací svíčka s komůrkou . . . . .	41
2.5 Současný stav problematiky na TUL . . . . .	42
2.6 Cíle disertační práce . . . . .	44
<b>3 Zařízení použitá k experimentům</b>	<b>45</b>
3.1 Motorové brzdové stanoviště . . . . .	45
3.2 Indikační aparatura . . . . .	46
3.3 Vizualizační technika . . . . .	47
3.3.1 Endoskopy . . . . .	48
3.3.2 Příprava před experimentem . . . . .	50
3.4 Měřicí ústředna MGCplus - HBM . . . . .	52
3.5 Emisní aparatura . . . . .	52

<b>4</b>	<b>Experimentální výzkum vlivu konstrukčního provedení ZS na vlastnosti zážehového motoru</b>	<b>53</b>
4.1	Program měření . . . . .	53
4.2	Způsob vyhodnocení a zpracování výsledků . . . . .	54
4.3	Výsledky měření . . . . .	56
4.3.1	Výkonové a provozní parametry motoru . . . . .	56
4.3.2	Parametry pracovního oběhu a parametry průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru . . . . .	58
4.3.3	Emisní vlastnosti motoru . . . . .	63
4.3.4	Snímky rozvoje hoření pro zapalovací svíčky BRISK A a B . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Experimentální výzkum a vývoj ZSIK</b>	<b>66</b>
5.1	ZSIK s vnitřním objemem $0,95\text{cm}^3$ . . . . .	66
5.1.1	Program měření . . . . .	68
5.1.2	Výsledky měření . . . . .	69
5.1.3	Optimalizační program na ZSIK . . . . .	75
5.2	ZSIK s vnitřním objemem $1\text{cm}^3$ . . . . .	83
5.2.1	Výsledky měření . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Tepelné namáhání</b>	<b>91</b>
6.1	Měření teplot v pouzdře zapalovací svíčky . . . . .	91
6.2	Modelování teplotního pole . . . . .	94
6.2.1	Okrajové podmínky . . . . .	95
6.2.2	Výsledky modelování teplotního pole . . . . .	97
<b>7</b>	<b>Zhodnocení výsledků</b>	<b>103</b>
7.1	Doporučení na pokračování práce . . . . .	105
7.1.1	Měření ionizačního proudu mezi elektrodami zapalovací svíčky . . . . .	105
	<b>Literatura</b>	<b>108</b>
	<b>Seznam publikací autora souvisejících s řešenou problematikou</b>	<b>114</b>
	<b>Seznam ostatních publikací autora</b>	<b>115</b>
	<b>Seznam funkčních vzorků autora</b>	<b>120</b>
	<b>Seznam užitečných vzorů a patentů autora</b>	<b>121</b>
<b>A</b>	<b>Přílohy</b>	<b>122</b>
A.1	Klasická zapalovací svíčka . . . . .	123
A.2	ZSIK . . . . .	132
A.3	Klasická zapalovací svíčka - vizualizace . . . . .	140
A.4	ZSIK - vizualizace . . . . .	146
A.5	Jednojiskrová zapalovací cívka . . . . .	155

## Seznam zkratek a symbolů

<b>ACIS</b>	advanced corona ignition system
<b>AVL</b>	Anstalt für Verbrennungskraftmaschinen
<b>BA95</b>	benzin automobilový 95 oktanů, bezolovnatý
<b>BA98</b>	benzin automobilový 98 oktanů, bezolovnatý
<b>Bosch</b>	výrobce zapalovacích svíček
<b>Brisk</b>	výrobce zapalovacích svíček
<b>CAD</b>	computer aided design
<b>CA50 [°]</b>	natočení klikového hřídele při vyhoření 50% směsi
<b>CH<sub>4</sub></b>	metan
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	propan
<b>CKAPJB</b>	Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka
<b>CMS</b>	řídící a měřicí systém
<b>CNG</b>	stlačený zemní plyn (Compressed natural gas)
<b>CO</b>	oxid uhelnatý
<b>CO<sub>2</sub></b>	oxid uhličitý
<b>CoV [%]</b>	variabilita
<b>Cylinder</b>	válcová jednotka
<b>C<sub>x</sub> [μF]</b>	kapacita kondenzátoru
<b>δ<sub>pl</sub></b>	šířka zóny laminárního plamene
<b>DiagRA-D</b>	diagnostický software
<b>Drehmoment [Nm]</b>	točivý moment
<b>E<sub>A</sub> [kJ·kmol<sup>-1</sup>]</b>	aktivační energie
<b>EA111.03E</b>	kódové označení motoru výrobcem
<b>EGR</b>	recirkulace výfukových plynů
<b>engine speed [1/min]</b>	otáčky motoru
<b>EŘJ</b>	elektronická řídící jednotka
<b>EU</b>	Evropská Unie
<b>EURO VI</b>	emisní předpis
<b>EV [mm]</b>	elektrodová vzdálenost
<b>eV</b>	elektronvolt
<b>flame-jet</b>	komůrkový zážeh
<b>F1</b>	formule 1
<b>HC</b>	uhlovodík
<b>HCHO</b>	formaldehyd
<b>HFIS</b>	high frequency ignition system
<b>HÚ</b>	horní úvrať
<b>H<sub>2</sub></b>	vodík
<b>IGNT [°]</b>	ignition timing - předstih zážehu
<b>IMEP [bar]</b>	indicated mean effective pressure
<b>jet-ignition</b>	komůrkový zážeh

<b>K</b>	reakční rychlost
<b>KH</b>	kliková hřídel
<b>KIVA-3V</b>	softwarový nástroj
<b>KVM</b>	Katedra vozidel a motorů
$\lambda$ [-]	bohatost směsi
<b>laser beam</b>	laserový paprsek
<b>LD</b>	laserová dioda
<b>Load (IMEPn) [bar]</b>	zatížení motoru (střední indikovaný tlak)
<b>LPG</b>	zkapalněný ropný plyn (Liquified Petroleum Gas)
<b>Mt_ISO [Nm]</b>	korigovaný točivý moment dle ISO normy
<b>n</b>	řád reakce
<b>n [1/min]</b>	otáčky
<b>Nd:YAG</b>	krystal yttrito hlinitého granátu dopovaný ionty neodymu
<b>NEDC</b>	New European Driving Cycle
<b>NO<sub>x</sub></b>	oxidy dusíku
<b>OS</b>	operační systém
<b>p [bar]</b>	tlak hořlavé směsi
<b>piston</b>	píst
<b>p<sub>i</sub> [bar]</b>	střední indikovaný tlak
<b>p<sub>max</sub> [bar]</b>	maximální (tzv. spalovací) tlak
<b>prechamber/chamber ignition</b>	komůrkový zážeh
<b>PSM</b>	pístový spalovací motor
<b>P_ISO [kW]</b>	korigovaný výkon dle ISO normy
<b>Q0% [°KH]</b>	uvolnění 0% tepla z celkového tepla do oběhu - v práci odpovídá předstihu zážehu
<b>Q5% [°KH]</b>	uvolnění 5% tepla z celkového tepla do oběhu
<b>Q10% [°KH]</b>	uvolnění 10% tepla z celkového tepla do oběhu
<b>Q50% [°KH]</b>	uvolnění 50% tepla z celkového tepla do oběhu
<b>Q90% [°KH]</b>	uvolnění 90% tepla z celkového tepla do oběhu
<b>Q5%-Q0% [°KH]</b>	trvání počáteční fáze hoření
<b>Q90%-Q10% [°KH]</b>	trvání hlavní fáze hoření
<b>R [kJ·K<sup>-1</sup>·kmol<sup>-1</sup>]</b>	univerzální plynová konstanta
<b>r<sub>KRIT</sub></b>	kritický poloměr ohniska
<b>r<sub>OHN</sub></b>	poloměr ohniska
<b>ROOH</b>	peroxydy
<b>ROOH</b>	hydroperoxydy
<b>R<sub>x</sub> [Ω]</b>	hodnoty odporu
<b>SAE</b>	SAE International, dříve Society of Automotive Engineers
<b>SMER [g·kW<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>]</b>	měrná spotřeba paliva
<b>Spark plug</b>	zapalovací svíčka
<b>Spark timing [°]</b>	předstih zážehu
<b>Strom in Zylinder [A]</b>	primární proud vysokofrekvenčního systému

$\bar{\sigma}_{pi}$	směrodatná odchylka středního indikovaného tlaku
<b>SW</b>	software
$\tau$ [°]	průtah zapálení (zážehu, vznícení), tzv. indukční doba
<b>T</b> [K]	absolutní teplota
<b>TCI</b>	transistor coil ignition
<b>TJI</b>	turbulent jet ignition
<b>T<sub>s</sub></b> [K]	teplota směsi
<b>TU</b>	Technická univerzita
<b>TUL</b>	Technická univerzita v Liberci
<b>VN</b>	vysoké napětí / vysokonapěťový
<b>VOCH</b>	vnější otáčková charakteristika
<b>VAR</b> [%]	variabilita
<b>VAR<sub>pi</sub></b> [%]	variabilita středního indikovaného tlaku
<b>VAR<sub>pmax</sub></b> [%]	variabilita maximálního (tzv. spalovacího) tlaku
<b>VW</b>	Volkswagen AG
<b>VOCH</b>	vnější otáčková charakteristika
<b>V<sub>Z1</sub></b> [dm <sup>3</sup> ]	zdvihový objem jedné válcové jednotky
<b>window</b>	okénko
<b>YAG</b>	yttrium aluminium garnet
<b>Zeit</b>	čas
<b>ZCH2000</b>	zatěžovací charakteristika při 2000 1/min
<b>ZCH3700</b>	zatěžovací charakteristika při 3700 1/min
<b>ZCH5000</b>	zatěžovací charakteristika při 5000 1/min
<b>ZS</b>	zapalovací svíčka
<b>ZSIK</b>	zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou
<b>3D</b>	trojrozměrný



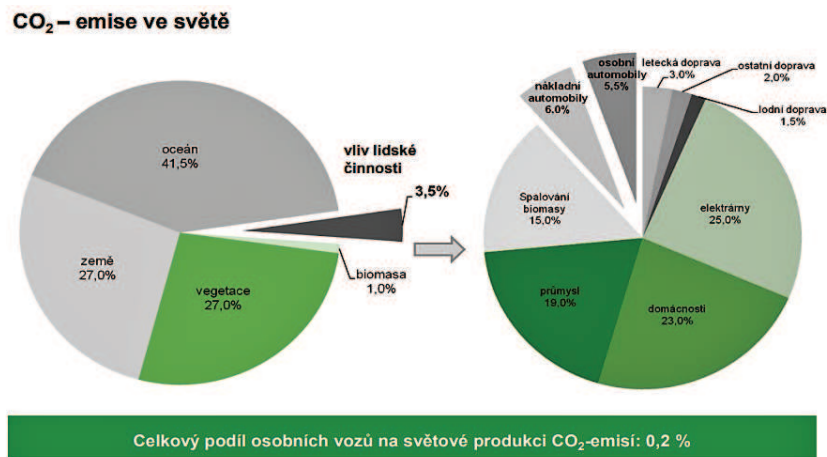
# 1 Úvod

Podíváme-li se do historie pístových spalovacích motorů (PSM) a jejich rozvoje v posledních desetiletích, lze již téměř s jistotou říci, že současná společnost si čím dál tím více uvědomuje negativní dopady svého počínání na celkový stav ovzduší a dopadů na klima Země a nastává doba výrazného hledání obnovitelných zdrojů energie a především pak ekologického smýšlení populace ve vyspělých zemích současného světa, se kterým úzce souvisí snaha o snižování tzv. skleníkových plynů. Obrázek 1.2 zobrazuje legislativní snižování produkce CO<sub>2</sub> u osobních automobilů v různých částech světa (byť je celkový podíl osobních vozů na světové produkci CO<sub>2</sub> cca 0,2% [21] 1.1).

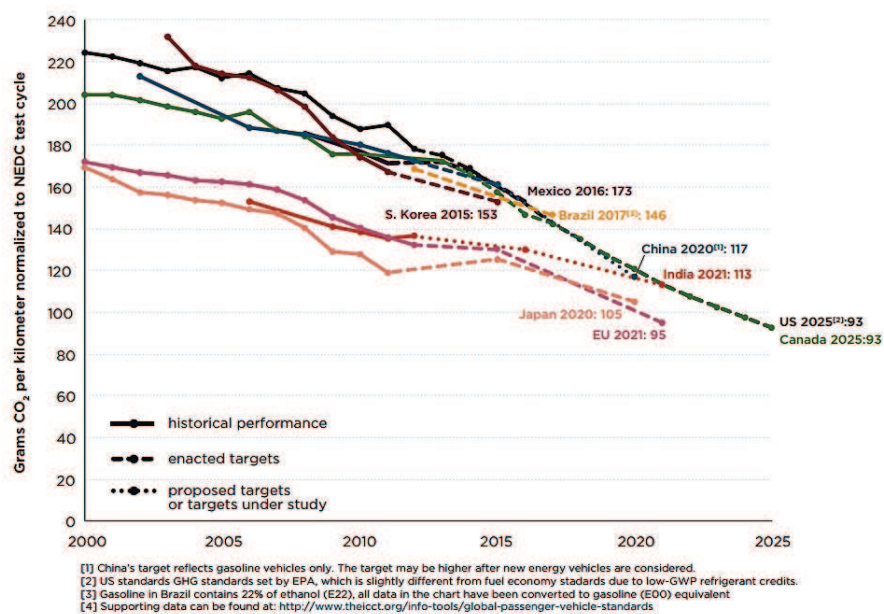
V průběhu existence vývoje a výroby PSM lze pozorovat velký pokrok jak po stránce technické, tak zákonodárné (především ve smyslu stále se zpřísnujících norem na výfukové emise viz. obrázek 1.2). S tím velmi úzce souvisí hledání takových technických řešení (byť jsou některá taková řešení poměrně výstřední – v dnešní době vzpomeňme např. kauzu dieseldate výrobce automobilů VW [10]), díky kterým jsou výrobci osobních automobilů, potažmo PSM, schopni splnit velmi přísné požadované emisní limity (zejména CO<sub>2</sub>, jehož průměrná flotilová produkce nesmí, pod pohrůzkou pokuty případně zákazu prodeje, od roku 2020 přesáhnout 95g/km [30]) ve stále širším (ve smyslu zatížení na otáčkách) spektru pracovní oblasti PSM. Velký podíl na tom má především velmi dynamický vývoj a rozvoj měřicí a regulační techniky v posledních letech s následnou aplikací na PSM. Stále přísnější emisní limity [13] nutí výrobce automobilů (potažmo PSM) k hledání např. tzv. hybridních řešení (zážehový PSM + elektromotor) a je tak zřejmé, že zážehové motory budou mít (především v EU) stále větší (oproti motorům vznětovým) procentuální zastoupení na trhu - jak ukazuje obrázek 1.3 nově registrovaných vozů dle typu PSM níže. Aktuálně činí procentuální podíl nově registrovaných vozů se zážehovým PSM v zemích EU 48,5% oproti registrovaným vozům se vznětovým PSM 46,3% (údaj k 10/2017 [9]).

Velmi významný a zcela nezbytný proces u zážehových PSM je proces spalování palivovzdušné směsi ve válci motoru. Tento proces je výsledkem složitých termochemických změn v náplni válce motoru a určuje průběh termodynamických dějů, které rozhodují o výkonových a ekologických parametrech motoru. Trvalým (a z pohledu spalování palivovzdušné směsi a výsledných parametrů motoru rozhodujícím) problémem u zážehových spalovacích motorů zůstává především počáteční fáze spalovacího procesu – iniciace hoření pomocí vysokonapěťového výboje mezi

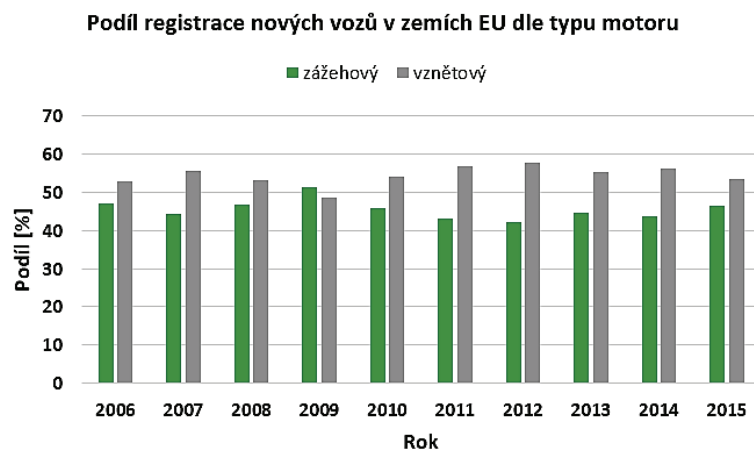
elektrodami zapalovací svíčky, mezi nimiž dochází k vytvoření ohniska zážehu. Podmínky pro počáteční fázi hoření tak jsou zdánlivě jednoznačné - skutečností však je tzv. mezicyklová variabilita, která se pohybuje v řádech jednotek %. Předložená práce se zabývá experimentálním vývojem a hledáním vhodného konstrukčního řešení takové zapalovací svíčky, která povede ke snížení mezicyklové variability a příznivým účinkům na provozní vlastnosti motoru.



Obrázek 1.1: Celkový podíl osobních vozů na světové produkci CO<sub>2</sub> emisí. [21]



Obrázek 1.2: Porovnání globálních předpisů produkce CO<sub>2</sub> pro osobní automobily podle normy NEDC g CO<sub>2</sub>/km. [13]



Obrázek 1.3: Podíl registrace nových vozů v zemích EU dle typu motoru. [31]

## 2 Přehled o současném stavu problematiky

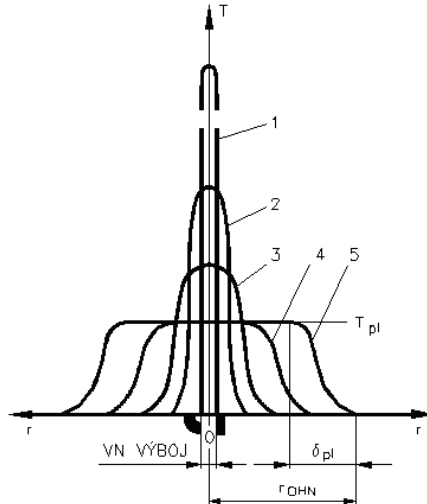
### 2.1 Spalovací proces ve válci motoru

Hoření palivovzdušné směsi ve válci PSM je složitý fyzikálně-chemický proces, jehož výsledkem jsou oxidační reakce ve směsi paliva a vzduchu (kyslíku). Ve válci PSM se tento děj uskutečňuje v podmínkách rychle se měnících teplot i tlaků palivovzdušné směsi. Má jiný průběh u motorů zážehových a jiný u motorů vznětových. Závisí na specifických vlastnostech použitého paliva, na způsobu tvoření palivovzdušné směsi a na její kvalitě (homogenitě, bohatosti) a především na způsobu iniciace hoření.

#### 2.1.1 Zážeh palivovzdušné směsi

Iniciace hoření palivovzdušné směsi v zážehových motorech probíhá mechanismem vysokoteplotního vznícení pomocí přívodu energie vysokonapětovým výbojem do velmi malého objemu připravené palivovzdušné směsi. Vysokonapětovým (VN) výbojem na elektrodách zapalovací svíčky se extrémně zvýší teplota ve velmi malém objemu palivovzdušné směsi. To nastartuje předoxidační reakce v palivovzdušné směsi, při kterých vznikají potřebné aktivované částice (radikály, peroxidy, ionty – endotermní předoxidační reakce) a které vyvrcholí vznikem ohniska (vysokoteplotním vznícením) s otevřeným plamenem (exotermní reakce) a jeho následným rozvojem a šířením fronty plamene do ostatní palivovzdušné směsi.

Při vysokonapětovém elektrickém výboji dojde k extrémně rychlému zvýšení teploty (teplota mezi elektrodami lokálně překračuje hodnotu  $10^4\text{°C}$ ). Vedle tepelné disociace molekul dochází k intenzivní ionizaci prostředí v okolí jiskřiště. To vyvolá bezprostřední reakce složek v palivovzdušné směsi, které probíhají vysokou rychlostí a rezultují nakonec završením této počáteční fáze zážehu vytvořením životaschopného ohniska zážehu. Pro homogenní palivovzdušnou směs se složením blízkým stechiometrickému směšovacímu poměru postačuje zapalovací energie ve velikosti do 3-5 mJ, přivedená během 0,6-1 ms. Mechanismus zážehu palivovzdušné směsi vysokonapětovým výbojem má několik fází: schematicky to ukazuje rozložení teplotního pole v blízkosti jiskřiště zapalovací svíčky na obr 2.1. [4, 5, 46]



Obrázek 2.1: Schéma vzniku a jednotlivé fáze rozvoje ohniska zážehu. [46]

- 1. V okamžiku vysokonapětového výboje prudce vzroste teplota mezi elektrodami zapalovací svíčky (křivka č.1).
- 2. Vedením tepla se z ohniska výboje začne rozšiřovat oblast zvýšené teploty (křivky 2, 3), teplota v ohnisku VN výboje přitom klesá.
- 3. Jakmile začne v ohnisku výboje oxidace směsi, pokles teploty se zpomalí, odvod tepla do okolí je kompenzován uvolněným teplem při oxidaci a hoření se z ohniska výboje rozšiřuje do dalšího objemu. Vojnov [46] uvádí, že pro spolehlivý rozvoj hoření z ohniska kulového objemu musí být poloměr ohniska zážehu ( $r_{OHN}$ ) 3x větší než šířka zóny plamene na čele hořící směsi, tj.  $r_{KRIT} = 3\delta_{pl}$ . Doba VN výboje by pro spolehlivý rozvoj hoření z ohniska zážehu měla trvat přinejmenším do dosažení tohoto stavu. Kulová plocha plamene s rozměrem  $r_{OHN} \geq r_{KRIT}$  je potom schopna samostatného dalšího rozvoje spalovacího procesu.

Velký význam pro nastartování spalovacího procesu (tj. hoření palivovzdušné směsi s uvolňováním tepla) mají předplamenné reakce (procesy iniciace spalovacího procesu), které probíhají v tvořícím se ohnisku hoření a při nichž dochází k vytváření tzv. aktivovaných částic. Vznik plamene je spojován s oxidační reakcí s relativně malým nárůstem teploty, kterou charakterizuje slabý namodralý svit (tzv. studené plameny, jejichž „světélkování“ je rozlišitelné pouze na temném pozadí – podstatou světélkování jsou chemiluminiscence, vyvolané především tvorbou formaldehydu HCHO). „Studenoplamennými“ a dalšími předoxidačními reakcemi v tvořícím se ohnisku hoření se zvyšuje koncentrace aktivovaných částic, až vznikne otevřený plamen. Důležitou vlastností hořlaviny (v tomto případě motorového paliva), která ovlivňuje procesy probíhající při iniciaci hoření, je schopnost zajistit za určitých podmínek dostatečnou dynamiku předplamenných (předoxidačních) reakcí. Teplota zapálení (zápalná teplota) palivovzdušné směsi není fyzikální veličinou

(konstantou) pro dané palivo - závisí sice na velikosti a stavbě molekuly paliva, ovlivňují ji však i další podmínky (směšovací poměr, celková tepelná bilance v ohnisku zapálení či vznícení a pod.) a časové dispozice pro dynamiku procesu zapálení. Vzájemnou vazbu těchto parametrů popisuje Semenovův vztah 2.1.

$$\tau \cdot p^n \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T_s}} = konst. \quad (2.1)$$

kde

- $\tau$  - průtah zapálení (zážehu, vznícení), tzv. indukční doba [s],
- $T_s$  - teplota palivovzdušné směsi [K],
- $p$  - tlak palivovzdušné směsi [bar],
- $n$  - řád reakce (obvykle  $1 < n < 2$ ),
- $E_A$  - aktivační energie [ $\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ],
- $R$  - univerzální plynová konstanta [ $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ].

Při srovnatelných podmínkách je teplota zapálení určena především velikostí aktivační energie.  $E_A$  jako aktivační energie je v jistém smyslu parametr paliva (palivovzdušné směsi), který vyjadřuje požadavek určité úrovně vnitřní energie paliva (palivovzdušné směsi), potřebné pro rozběh oxidačních reakcí. Vysvětlení mechanismu zapálení palivovzdušné směsi je založeno na podmínce, že nejprve musí stoupnout energetická hladina molekul palivovzdušné směsi ( $R \cdot T$ ) nad hodnotu aktivační energie v určitém objemu palivovzdušné směsi tak, aby předoxidačními reakcemi v palivovzdušné směsi vznikla potřebná počáteční koncentrace aktivovaných částic (aktivních radikálů), nutná ke vzniku otevřeného plamene s následným samovolným pokračováním řetězových spalovacích reakcí v již hořící palivovzdušné směsi. Pro uhlovodíková paliva se velikosti aktivačních energií pohybují v rozsahu 20-400 MJ/kmol: např. pro naftu se uvádí aktivační energie ve velikostech až do 45 MJ/kmol, benzinová paliva mají aktivační energii 90-150 MJ/kmol, plynná uhlovodíková paliva potom v rozsahu 250-400 MJ/kmol. Při zvyšování teploty palivovzdušné směsi se aktivační energie snižují (u benzinových paliv až na 40 MJ/kmol) [46]: zvýšená vnitřní energie (tj. vyšší kinetická energie tepelného pohybu molekul) přispívá k překonání energetického potenciálu potřebného k rozběhu reakce.

### Chemický mechanismus vzniku aktivovaných částic

Vlivem vysoké teploty se molekuly uhlovodíkového paliva, které přišly do styku s kyslíkem, mění na radikály s peroxidovou vazbou (-O-O-) a dále na peroxidy (RO-OR) a hydroperoxy (ROOH). Tento proces je možno sumárně vyjádřit vztahem:



Vytvořené peroxidy (ROOR) a hydroperoxy (ROOH) se rychle rozpadají a vznikají energeticky bohaté aktivované částice – volné radikály, které iniciují průběh dalších řetězových reakcí spojených s uvolňováním velkého množství tepla:



Po vytvoření dostatečné hmotnostní koncentrace aktivovaných částic celý proces vrcholí vznikem ohniska hoření. Z ohniska se hoření začíná rozšiřovat účinkem přestupu tepla a postupným zvyšováním koncentrace produktů předoxidačních reakcí v oblasti těsně před zónou hoření v ohnisku zážehu: hmotnostní koncentrace aktivovaných částic v nespálené palivovzdušné směsi se zvyšuje jednak teplotním účinkem (vedením tepla) z čela plamene, jednak do nespálené palivovzdušné směsi pronikají aktivované částice i ze zóny hoření. Tím se vytváří vhodné podmínky pro šíření plamene do okolní palivovzdušné směsi - postup plamene až do úplného vyhoření palivovzdušné směsi v celém objemu spalovacího prostoru (válce motoru) je zajištěn šířením a rozvojem oxidačních reakcí nejprve z ohniska zážehu a následně i z dalších oblastí postupujícího hoření. Počáteční rychlost hoření homogenních palivovzdušných směsí ve válci motoru se řídí především zákony chemické kinetiky (Arrheniův vztah viz. 2.4) – proto se toto hoření označuje jako hoření kinetické. Další fáze hoření homogenních palivovzdušných směsí probíhá v režimu tzv. deflagračního plamene s rozšířením zóny plamene a zvýšením rychlosti hoření účinkem turbulencí a na závěr vyhořívání náplně válce se rychlost hoření snižuje důsledkem poklesu koncentrací některé ze složek v palivovzdušné směsi.

$$K = konst \cdot e^{\frac{-E_A}{R \cdot T}} \quad (2.4)$$

kde:

- R - univerzální plynová konstanta [ $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ],
- T - absolutní teplota [K],
- $E_A$  - aktivační energie, konstanta pro konkrétní složku reagující palivovzdušné směsi - vyjadřuje požadavek určité úrovně vnitřní energie látky, podmiňující začátek oxidačních reakcí [ $\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ],

Formování ohniska hoření u zážehových motorů v jediném místě (tj. mezi elektrodami zapalovací svíčky) je negativně ovlivněno řadou činitelů, které působí na vytváření a koncentraci aktivovaných částic v ohnisku a jeho bezprostředním okolí:

- Nízká a přitom proměnlivá energie VN výboje (u vozidlových zážehových motorů cca  $10 \div 20$  mJ) s dobou trvání cca 1 ms.
- Rozvíření náplně válce a zejména pohyb náplně (palivovzdušné směsi) v těsné blízkosti jiskřiště ovlivňují koncentraci produktů předoxidačních reakcí i ionizaci prostředí v průběhu VN výboje (z tvořícího se ohniska hoření jsou produkty předoxidačních reakcí vynášeny do okolí).
- Určitá lokální nehomogenita palivovzdušné směsi a změny ve složení palivovzdušné směsi v okolí ohniska zážehu působením zbytků spalín z předcházejícího cyklu.



- Významný vliv na průtah zážehu má stav palivovzdušné směsi ve válci motoru - projevuje se zejména kvantitativní regulace výkonu zážehového motoru, kterou se snižuje tlak čerstvé náplně ve válci (v režimech velmi nízkého zatížení až na  $\approx 0,25$  bar) a zvyšuje se množství zbytkových plynů v čerstvé náplni válce, což vede k prodlužování průtahu zážehu.

Výsledkem působení uvedených činitelů je relativně velká mezicyklová variabilita doby iniciace hoření u zážehových motorů i kvalita (energetický potenciál) vytvořeného ohniska hoření, které mají za následek relativně velký průtah zážehu (tj. úseku od VN výboje k počátku skutečného počátku hoření palivovzdušné směsi ve válci [33]) i velkou mezicyklovou variabilitu následného průběhu hoření.

Termodynamické analýzy změřených indikátorových diagramů zážehových motorů jednoznačně dokazují, že na snížení mezioběhové variability a na celkový nárůst rychlosti vyhořívání náplně válce (potřebné k zajištění kvalitní indikované účinnosti pracovního oběhu motoru) má podstatný vliv rychlost oxidačních reakcí v první fázi hoření, do spálení cca 5% paliva, tj. množství palivovzdušné směsi v bezprostředním okolí ohniska hoření. Vysokotlaká indikace zážehových motorů a on-line termodynamická analýza změřených indikátorových diagramů (přesné měření průběhu tlaku v jednotlivých válcích motoru i polohy klikového hřídele motoru) jsou dnes standardním nástrojem ve výzkumu a vývoji vozidlových motorů. Vhodným doplněním vysokotlaké indikace je potom vizualizace počáteční fáze spalovacího procesu v motoru. [4, 5]

## 2.1.2 Ionizace plynů a ionizační proud

Procesy probíhající při spalování ve válci motoru bývají často sledovány a zkoumány teoreticky s využitím zákonů termodynamiky nebo chemické kinetiky.

Některé děje ve válci zážehového motoru je možné sledovat též zjišťováním průběhu ionizace plynu mezi elektrodami zapalovací svíčky nebo v jiném místě. Z úrovně ionizace plynu ve válci motoru zjišťované měřením ionizačního proudu lze získat některé informace o průběhu dějů probíhajících ve válci motoru. Na ionizaci plynu mezi elektrodami zapalovací svíčky závisí časový průběh a další parametry elektrického výboje, např. hodnota přeskokového napětí a průběh napětí a proudu mezi elektrodami svíčky při výboji, které významně ovlivní iniciaci spalování palivovzdušné směsi ve válci a tím i průběh pracovního oběhu. Průběh ionizace se zjišťuje měřením ionizačního proudu.

Plyny složené z volně pohyblivých molekul jsou za normálních podmínek velmi dobrými izolanty. Aby byl plyn elektricky vodivý, musí obsahovat částice s elektrickým nábojem. Vodivými se plyny stanou ionizací, kdy se některé molekuly plynu dodáním energie rozštěpí na kationt a volný elektron. Uvolněné elektrony se mohou připojovat k neutrálním molekulám a vytvářet tak aniony. Elektrický proud v plynech tvoří kladné i záporné ionty a volné elektrony.

Kladné ionty vznikají odtržením elektronu z vnější slupky atomového obalu. K rozštěpení molekul je potřebná ionizační energie – řádově jednotek až několika desítek eV ( $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ), např. pro vodík 13,5 eV, pro kyslík 15,6 eV. Záporné



ionty vznikají méně často přichycením elektronu k částici. Současně s ionizací probíhá v plynu i opačný děj, tzv. rekombinace. Nesouhlasně nabitě částice se přitahují a vytvářejí opět neutrální molekuly. Pokud převládá ionizace nad rekombinací, zvyšuje se počet ionizovaných molekul a tedy i elektrická vodivost plynu. Pokud je tomu opačně, vodivost se snižuje.

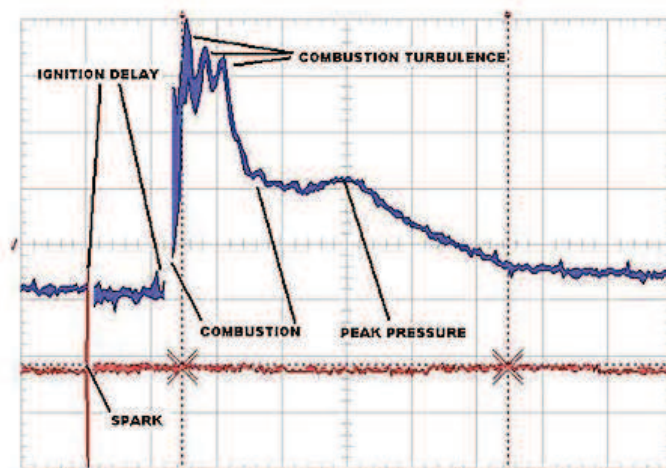
K ionizaci plynu může dojít působením elektrického pole, vysokých teplot, fotonů nebo radioaktivního záření. Pokud se ionizovaný plyn nachází v elektrickém poli mezi dvěma elektrodami, vznikne elektrický proud jako uspořádaný pohyb kationtů k záporně nabitě katodě, aniontů a elektronů ke kladně nabitě anodě. Ionty, které dopadají na elektrody, ztrácejí svůj náboj a mění se v neutrální molekuly. Proud protékající ionizovaným plynem mezi elektrodami závisí na napětí mezi elektrodami, na složení, tlaku a teplotě plynu i na tvaru a materiálu elektrod.

Ionizace plynu ve válci spalovacího motoru je vyvolána jednak působením vysoké teploty, jednak elektrickým polem mezi elektrodami, na které je přivedeno elektrické napětí ze zapalovací soupravy.

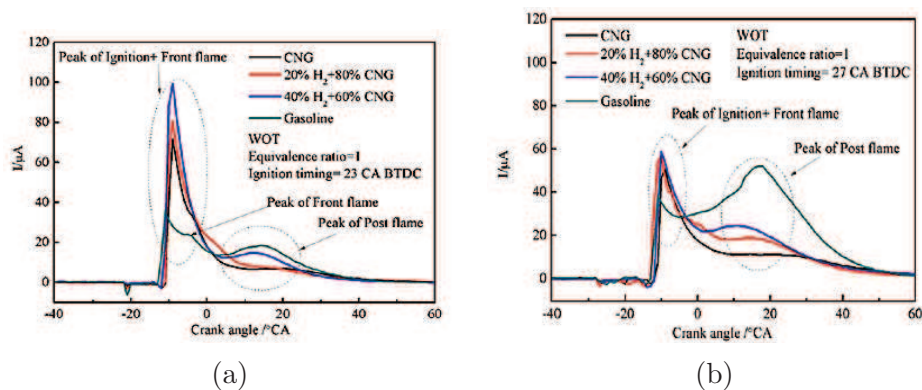
Měření ionizačního proudu mezi elektrodami zapalovací svíčky se často využívá při výběru optimální zapalovací svíčky pro určitý motor. Posuzována je zejména intenzita ionizace plynu mezi elektrodami zapalovací svíčky v době před počátkem výboje, a tak se zjišťuje náchylnost k předčasným zápalům.

Typický průběh ionizačního proudu mezi elektrodami zapalovací svíčky v závislosti na úhlu klikového hřídele má dva vrcholy, jak je patrné např. z grafu na obrázku 2.2 převzatého z [17]. První - vyšší - vrchol se nachází v počáteční fázi intenzivního hoření. Druhý - menší - vrchol ionizačního proudu je přibližně v místě maximálního tlaku ve válci. Z průběhu ionizačního proudu je možné zjistit, zda nedochází k předčasným zážehům.

Na obrázku 2.3 jsou průběhy ionizačních proudů převzaté z [51], naměřené u motoru při chodu na paliva: CNG, benzin, 20% H<sub>2</sub> + 80% CNG a 40% H<sub>2</sub> + 60% CNG při otáčkách 2000 1/min a 3000 1/min, předstih zážehu 23° před horní úvratí.



Obrázek 2.2: Průběh ionizačního proudu s vyznačenými třemi úseky: průtah zážehu, počáteční fáze intenzivního hoření, pokračující vyhořívání náplně válce. Vyznačen je ionizační proud při dosažení maximálního tlaku ve válci. Převzato z [17].



Obrázek 2.3: a) Průběhy ionizačních proudů motoru provozovaného na CNG, benzin, 20% H<sub>2</sub> + 80% CNG a 40% H<sub>2</sub> + 60% CNG při otáčkách 2000 1/min, předstih zážehu 23° před HÚ. Převzato z [51].

b) Průběhy ionizačních proudů motoru provozovaného na CNG, benzin, 20% H<sub>2</sub> + 80% CNG a 40% H<sub>2</sub> + 60% CNG při otáčkách 3000 1/min, předstih zážehu 27° před HÚ. Převzato z [51].

### 2.1.3 Variabilita parametrů spalovacího procesu a pracovního oběhu PSM

Ukazatelem kvality a stability spalovacího procesu ve válci PSM je variabilita pracovních cyklů motoru. Variabilita (označována různě - například VAR, CoV,...) cyklů se zpravidla vyjadřuje jako poměr směrodatné odchylky k průměrné hodnotě daného parametru. Obecně lze vztah pro výpočet variability parametru ( $x_y$ ) zapsat dle 2.5. Způsob vyhodnocování a určování parametrů hoření pomocí SW Concerto ze změřených indikátorových diagramů je popsán v kapitole 4.2.

$$VAR_{xy} = \frac{\overline{\sigma_{xy}}}{\overline{x_y}} \quad (2.5)$$

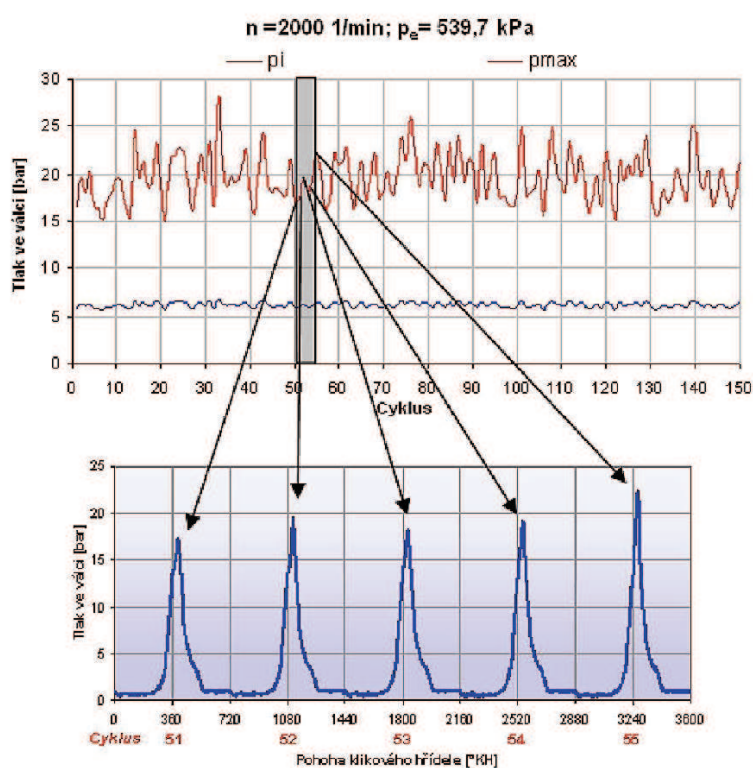
- $\overline{x_y}$  hodnota parametru určeného termodynamickou analýzou a statistickým zpracováním většího souboru indikátorových diagramů ve vyšetřovaném provozním režimu motoru (při vysokotlaké indikaci motoru se zpravidla zaznamenává soubor dat ze 100 nebo 150 po sobě následujících pracovních cyklů motoru).
- $\overline{\sigma_{xy}}$  směrodatná odchylka daného parametru ze statistického zpracování souboru indikátorových diagramů.

Konkrétně pak například pro stření indikovaný tlak platí 2.6.

$$VAR_{pi} = \frac{\overline{\sigma_{pi}}}{\overline{p_i}} \quad (2.6)$$

- $\bar{p}_i$  střední indikovaný tlak.
- $\sigma_{p_i}$  směrodatná odchylka středního indikovaného tlaku.

U moderního benzinového motoru v režimech vyššího zatížení motoru se variabilita středního indikovaného tlaku  $p_i$  pohybuje v hodnotách  $VAR_{p_i} \approx 1-2\%$ . S poklesem zatížení motoru se variabilita  $p_i$  zvyšuje, vysokou variabilitou se potom vyznačuje zejména režim volnoběhu. Vedle mezicyklové variability středního indikovaného tlaku je zajímavá i variabilita maximálního (tzv. spalovacího) tlaku ve válci. Beroun [4, 5] uvádí, že se hodnoty  $VAR_{p_{max}}$  u zážehových motorů pohybují  $\approx 8-9\%$  (při  $\lambda=1$  a  $VAR_{p_i} \approx 2\%$ ) při normálním průběhu hoření tzn. bez klepání. Změřený a vyhodnocený průběh tlaků ve spalovacím prostoru zážehového PSM v režimech s relativně vysokou hodnotou variability středního indikovaného i maximálního tlaku ukazuje obrázek 2.4.



Obrázek 2.4: Průběhy tlaků ve spalovacím prostoru zážehového motoru Škoda 1,4 MPI v režimu středního zatížení ( $p_i=6,25\text{bar}$ ,  $VAR_{p_i}=4,14\%$ ,  $p_{max}=19,67\text{bar}$ ,  $VAR_{p_{max}}=13,225\%$ ). [6]

## 2.2 Zapalovací svíčka

Zapalovací svíčka bývá zpravidla umístěna v hlavě válců motoru a její koncová část (elektrody) vyčnívá do spalovacího prostoru PSM (vyjímkou mohou být některá konstrukční řešení uvedená v kapitole 2.4). Zapalovací svíčka slouží k

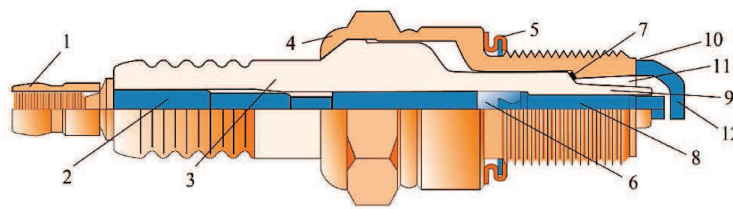
vytvoření vysokonapěťového výboje nutného ke vzniku ohniska zážehu. Zažehnutí palivovzdušné směsi musí zcela bezpečně nastat při všech provozních režimech spalovacího motoru, během kterých je pak zapalovací svíčka vystavena působení poměrně velkého počtu potencionálně nepříznivých jevů, kterým musí spolehlivě odolávat - uvedeno v tabulce 2.1 níže.

Požadavky na elektřinu	Tepelné požadavky	Mechanické požadavky	Elektrochemické požadavky
Spolehlivý přenos vysokého napětí i při zapalovacím napětí okolo 40 kV.	Odolnost vůči tepelným rázům (horké výfukové plyny - sání studeného vzduchu).	Tlakové a vzduchové utěsnění spalovacího prostoru, odolnost vůči oscilujícím tlakům do cca 100 bar.	Odolnost vůči opálení kontaktů, spalinám a zbytkům po hoření.
Dobrá izolační schopnost i při teplotách okolo 1000°C, ochrana před jiskřením a výboji.	Činná část izolátoru s dobrou tepelnou vodivostí včetně elektrod.	Vysoká mechanická pevnost pro spolehlivou montáž.	Prevence tvorby usazenin na izolátoru.

Tabulka 2.1: Požadavky na zapalovací svíčky. [47]

Na obrázku 2.5 níže je zobrazena konstrukce zapalovací svíčky v řezu. Pozice (1) označuje konektor zapalovací svíčky s konektorem typu SAE (starší typy zapalovacích svíček jsou osazeny konektorem se závitem M4), který slouží k přivedení zapalovacího napětí ke střední elektrodě. Pozice (2) zobrazuje ocelový svorník, který je vzduchotěsně zalitý ve vodivé sklovité tavenině a zajišťuje spojení se střední elektrodou. Keramický izolátor (3) na bázi oxidu hlinitého izoluje středovou elektrodu vůči ukostření při napětí až 40 kV. Izolátor je vyráběn zejména v profilovaném provedení (čímž je zabraňováno tvorbě nežádoucích výbojů) nebo provedení hladkém. Pouzdro (4) je povrchově upraveno a vzduchotěsně spojeno s izolátorem využitím procesu tepelného smrštění, a proto oblast smrštění vykazuje modré oxidační zbarvení. Závit slouží k upevnění zapalovací svíčky do hlavy válců. Nespádávající vnější těsnící podložka (5) slouží k utěsnění a odvodu tepla (použita u svíček s dosedací plochou, u kuželového sedla použita není). Pozice (6) značí elektrické spojení dříku a středové elektrody. U odrušených typů (R typů) se jedná o odporovou skelnou taveninu. Vhodnými aditivami lze definovaně ovlivnit stupeň odporu skelné taveniny tak, aby se dosáhlo požadované odolnosti vůči opalu elektrod v jiskřišti a odrušo-

vacích charakteristik. Vnitřní těsnící kroužek (7) tvoří vzduchotěsné spojení mezi izolátorem a kovovým pouzdem a zajišťuje odvod tepla. Středová elektroda (8) se skládá z měděného jádra zapouzdřeného v plášti z niklové slitiny. V závislosti na typu může být konec středové elektrody z platiny, wolframu, iridia nebo stříbra. Činná část izolátoru (9) zasahuje až do spalovacího prostoru a má zásadní vliv na tepelnou hodnotu zapalovací svíčky. Zkosená vodící hrana (10) usnadňuje montáž zapalovací svíčky. Část zasahující do kompresního prostoru (11) ovlivňuje samočističí schopnost zapalovací svíčky. K pouzdru zapalovací svíčky je přivařena buď jedna nebo více vnějších elektrod (12), které společně se středovou elektrodou tvoří dráhu jiskry. [47]



Obrázek 2.5: Konstrukce zapalovací svíčky. [47]

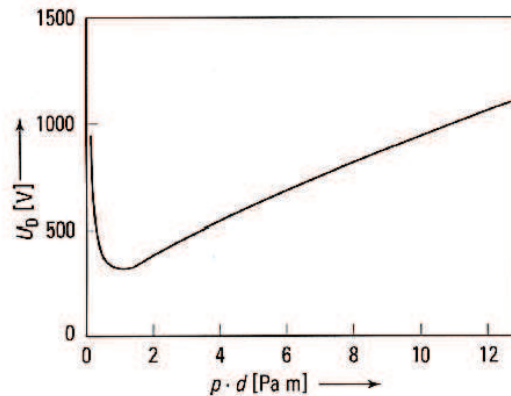
### 2.2.1 Přeskové napětí, elektrodová vzdálenost

Velmi důležité k zažehnutí palivovzdušné směsi je u zapalovacích svíček vytvoření podmínek pro přeskok jiskry mezi elektrodami. Přeskok jiskry závisí samozřejmě na napětí od zapalovacího systému přivedeného na elektrodu zapalovací svíčky, především pak ale také na geometrii koncové části zapalovací svíčky – tedy vzdálenosti elektrod (viz. obrázek 2.6) a pak také na tvarové geometrii elektrod. Velmi důležitým faktorem, na kterém závisí přeskok jiskry mezi elektrodami zapalovací svíčky je teplota a tlak uvnitř spalovacího prostoru PSM,  $\lambda$  poměr palivovzdušné směsi a turbulence a nehomogenita náplně válce. Správně zvolená elektrodová vzdálenost vede ke správné „aktivaci“ palivovzdušné směsi v celém objemu a tím pádem ke stabilnějšímu spalování, ke kterému je ale zapotřebí vyššího přeskového napětí. [34] V roce 1889 F. Paschen definoval tzv. Paschenův zákon, který říká, že napětí potřebné pro přeskok jiskry na zapalovací svíčce  $U[V]$  je závislé na tlaku  $p[Pa]$  uvnitř válce a elektrodové vzdálenosti  $d[m]$  2.7. Grafické znázornění přeskového napětí na teplotě a tlaku ukazuje obrázek 2.7.

$$U = f(p \cdot d) \quad (2.7)$$



Obrázek 2.6: Označení elektrodové vzdálenosti u zapalovacích svíček s jednou a více vnějšími elektrodami. [47]

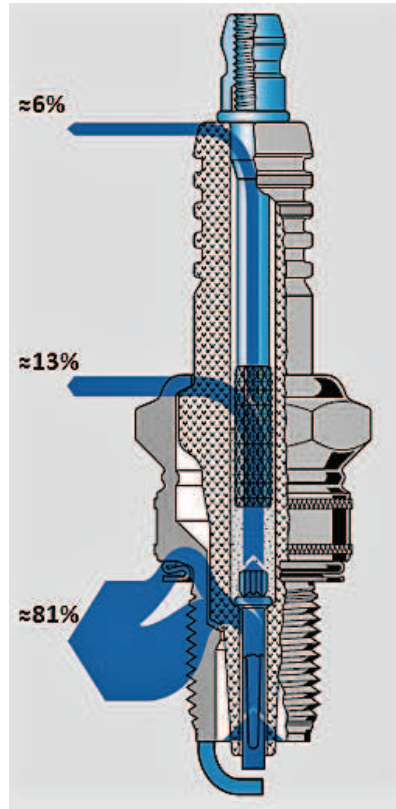


Obrázek 2.7: Paschenova křivka. [34]

## 2.2.2 Vedení tepla, tepelná hodnota zapalovací svíčky

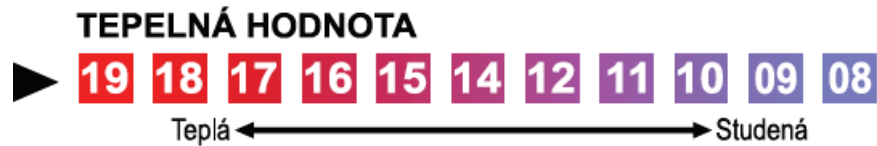
Při spalovacím procesu ve válci motoru může krátkodobě vzrůst teplota až na cca 3000°C a při této teplotě dochází k intenzivnímu ohřevu vlastní zapalovací svíčky. Prostřednictvím různých cest odvodu tepla se ze zapalovací svíčky odvádí přibližně 80% absorbovaného tepla vedením (viz. obrázek 2.8). Převážná většina tohoto tepla je přenášena závitem na pouzdře svíčky přímo do hlavy válce. Zapalovací svíčky je tedy potřeba vždy utáhnout na, daným výrobcem, předepsaný utahovací moment. Pouze asi 20% tepla odebírá a odvádí palivovzdušná směs, která proudí kolem svíčky. Využitím kompozitních elektrod, např. niklových elektrod s měděným jádrem, je možné dosáhnout výrazně účinnějšího vedení tepla. Je-li poloha jiskřiště ve spalovacím prostoru extrémně vysunutá, lze rychle dosáhnout samočistící schopnosti (díky specifické poloze činné části izolátoru absorbujícího teplo) a horní maximální limit teploty na izolátoru se drží pod 900°C. [14, 47]



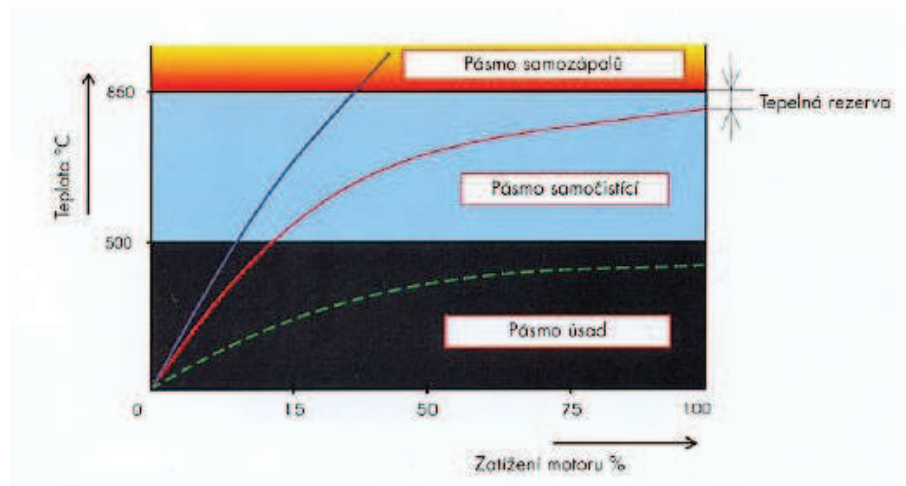


Obrázek 2.8: Zobrazení způsobu odvodu tepla zapalovací svíčkou s vyznačením "cest" s procentuálním vyjádřením. [14]

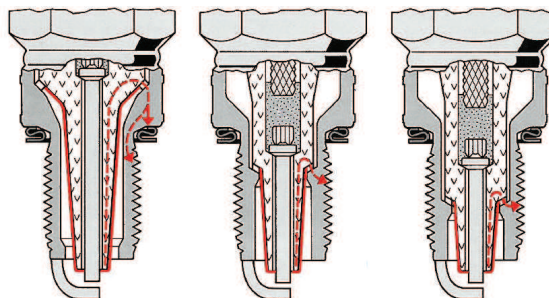
Základním faktorem pro volbu zapalovacích svíček je bezesporu tepelná hodnota - na obrázku 2.9 jsou uvedena značení pro tzv. teplé a studené svíčky. Tepelná hodnota svíčky je někdy uváděna číslem, které vyjadřuje doporučení podle hodnoty středního indikovaného tlaku pracovního oběhu motoru. Pro dlouhé špičky izolátoru (disponujícími velkou plochou) platí, že dokáží přijmout velké množství tepla v krátké době. Takové zapalovací svíčky se po studeném startu motoru ohřívají relativně rychle, mají nízkou tepelnou hodnotu a označují se jako „teplé“. Na druhé straně krátká špička izolátoru s malou plochou přijímá malé množství tepla, které je rychle odváděno pouzdrem zapalovací svíčky. Taková svíčka se méně zahřívá, má velkou tepelnou hodnotu a označuje se jako „studená“. Zapalovací svíčky s vysokou tepelnou hodnotou tj. „studené“ jsou určeny především pro zážehové motory s vysokým tepelným zatížením a vysokým kompresním poměrem. Při použití zapalovací svíčky o nízké tepelné hodnotě dochází k jejímu přehřívání (850 – 950 °C), což má za následek samovznícení palivovzdušné směsi a detonační hoření. Naopak při použití svíčky o vysoké tepelné hodnotě nemusí být dosaženo samočisticí teploty a dochází ke vzniku usazenin z produktů spalování paliva (popř. oleje) na elektrodách svíčky - v důsledku toho dochází ke zhoršení kvality zážehu viz. obrázek 2.10. Tepelná hodnota svíčky je pouze přibližný porovnávací parametr - svíčky se stejnou tepelnou hodnotou od různých výrobců se mohou svými vlastnostmi více či méně odlišovat. [14, 47, 49]



Obrázek 2.9: Označování zapalovacích svíček o různé tepelné hodnotě. [49]



Obrázek 2.10: Vliv teploty špičky izolátoru na správnou volbu tepelné hodnoty zapalovací svíčky. Křivka vpravo zobrazuje příliš studenou zapalovací svíčku, prostřední křivka zobrazuje vhodnou svíčku a křivka vlevo zobrazuje příliš teplou svíčku pro daný motor. [49]

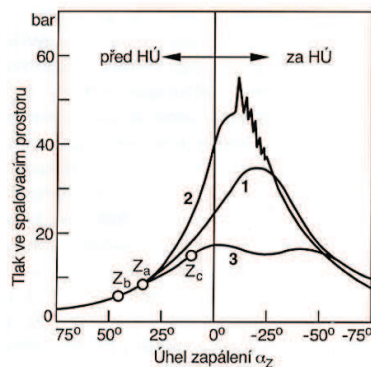


Obrázek 2.11: Schematické zobrazení zapalovacích svíček o různých délkách špičky izolátoru střední elektrody zasahujících do spalovacího prostoru PSM - tedy i různých tepelných hodnotách. Vlevo je vyznačena tzv. teplá svíčka (s poměrně dlouhou špičkou izolátoru vystaveného tepelnému namáhání uvnitř spalovacího prostoru), uprostřed je svíčka o střední tepelné hodnotě (rovněž se střední délkou špičky izolátoru) a vpravo pak svíčka studená (s velmi krátkou špičkou izolátoru zasahujícího do spalovacího prostoru). Plná červená čára vyznačuje oblast, která je tepelně namáhána zažehnutou palivovzdušnou směsí v PSM, přerušovaná čára označuje "cestu" vedení tepla do hlavy válců. [7]



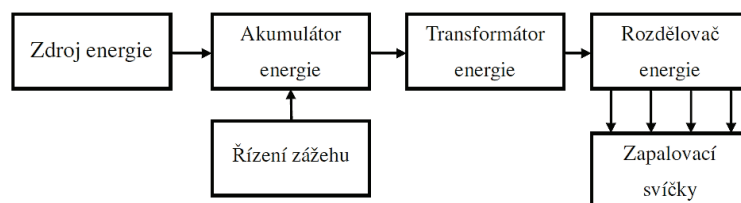
## 2.3 Zapalovací systémy zážehových spalovacích motorů

Během doby, po kterou jsou zážehové spalovací motory vyvíjeny a používány, došlo rovněž k vývoji způsobů a typů zapalovacích systémů (jejichž úlohou je zapálit za každých okolností palivovzdušnou směs a navodit její hoření [15]), které jsou pro tyto motory klíčové. Okamžik zážehu palivovzdušné směsi je vázán na polohu pístu před horní úvratí (natočení klikového hřídele) - označuje se jako předstih zážehu. Tento parametr je závislý na otáčkách motoru, jeho zatížení, bohatosti palivovzdušné směsi  $\lambda$  a rovněž je řízen a měněn tak, aby nedocházelo k detonačnímu spalování viz. např. obrázek 2.12.



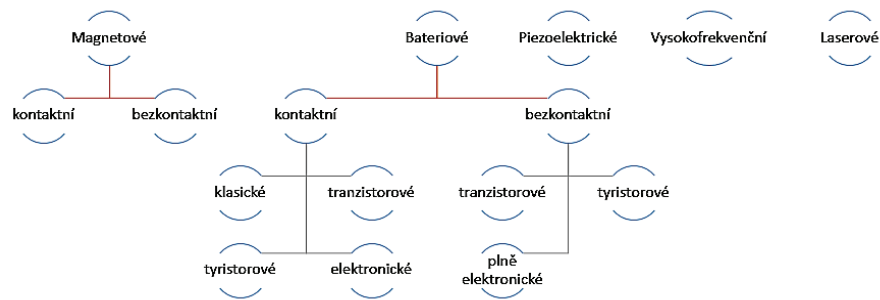
Obrázek 2.12: Průběh tlaku ve spalovacím prostoru při různých hodnotách předstihu. 1: správný předstih, zapálení  $Z_a$  ve správném okamžiku; 2: velký předstih, zapálení  $Z_b$  příliš brzo (klepání při spalování); 3: malý předstih, zapálení  $Z_c$  příliš pozdě. [50]

Způsob zapalování palivovzdušné směsi v zážehových PSM je vždy založen na současném stavu a rozvoji techniky a v neposlední řadě je v posledních letech rovněž doprovázen jistými marketingovými trendy. Zapalovací systém jako celek se vždy skládá ze zdroje energie, spínače, indukční cívky transformující nízké napětí na vysoké, rozdělovače a zapalovacích svíček (viz. schéma na obrázku 2.13).



Obrázek 2.13: Obecné schéma zapalovacího systému. [16]

Zapalovací systémy zážehových PSM pak lze rozdělit například:

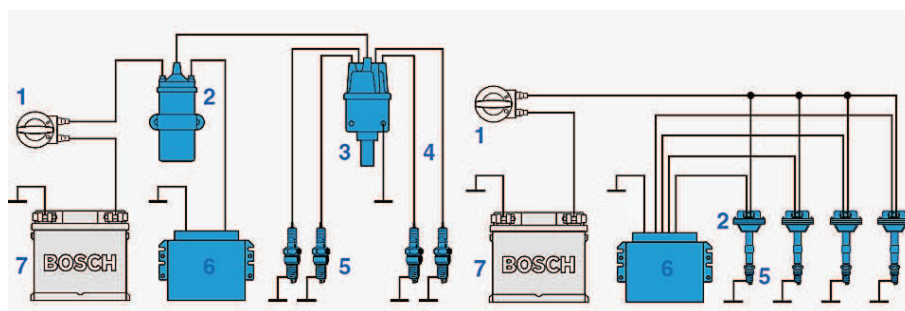


Obrázek 2.14: Možné rozdělení zapalovacích systémů PSM.

Následující podkapitoly popisují a shrnují vybrané možné způsoby a varianty zapalovacích systémů zážehových PSM.

### 2.3.1 Plně elektronické bezkontaktní bateriové zapalování

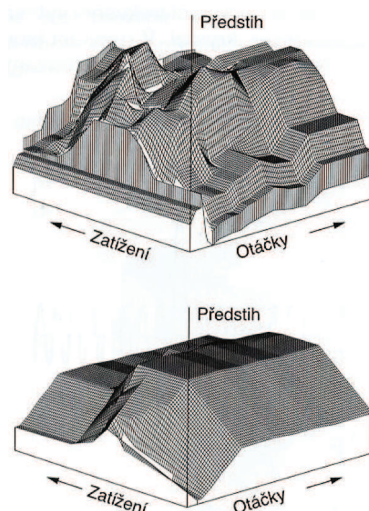
Plně elektronické zapalování nemá mechanický rozdělovač vysokého napětí (výhodou je podstatné snížení rušení, snížení hlučnosti, snížení počtu vysokonapěťových spojů, žádné pohyblivé části a jednodušší konstrukce [50]). Vysoké napětí je přiváděno na zapalovací svíčky ze zapalovacích cívek po pevných vodičích. [15] V dnešní době je nejvíce využíváno zapalování s jednojiskrovými zapalovacími cívkami - jedná se o nejrozšířenější způsob zapalovacího systému u dnes vyráběných moderních zážehových PSM. K řízení je využíván snímač otáček a polohy klikového hřídele. Na obrázku 2.15 je schematicky znázorněn rozdíl mezi bateriovým elektronickým zapalováním s rozdělovačem a plně elektronickým bateriovým zapalováním. Zřejmá je absence rozdělovače (3) a integrace zapalovací cívky (2) do kompaktních rozměrů zapalovacího modulu pro každý jednotlivý válec.



Obrázek 2.15: Srovnání elektronického bateriového zapalování s rozdělovačem (vlevo) a plně elektronického bateriového zapalování (vpravo). [14]

Plně elektronické bateriové zapalování pro svou funkci využívá elektronickou řídicí jednotku - EŘJ (6), která využívá pro správnou funkci zapalování signály ze vstupních snímačů (otáčky a poloha klikového hřídele, zatížení (tlak v sání), polohy škrtecí klapky, teploty, napětí akumulátoru). Na základě aktuálně získaných informací o přesném pracovním bodu spalovacího motoru EŘJ upravuje předstih zážehu

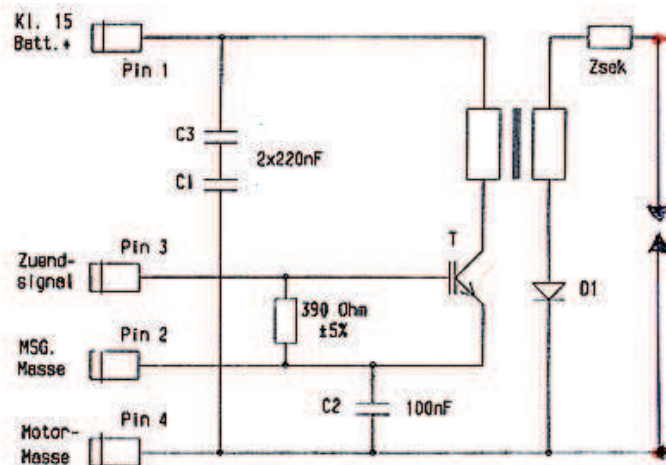
dle předem naprogramované a optimalizované 3D mapy, která je v EŘJ uložena - viz. obrázek 2.16.



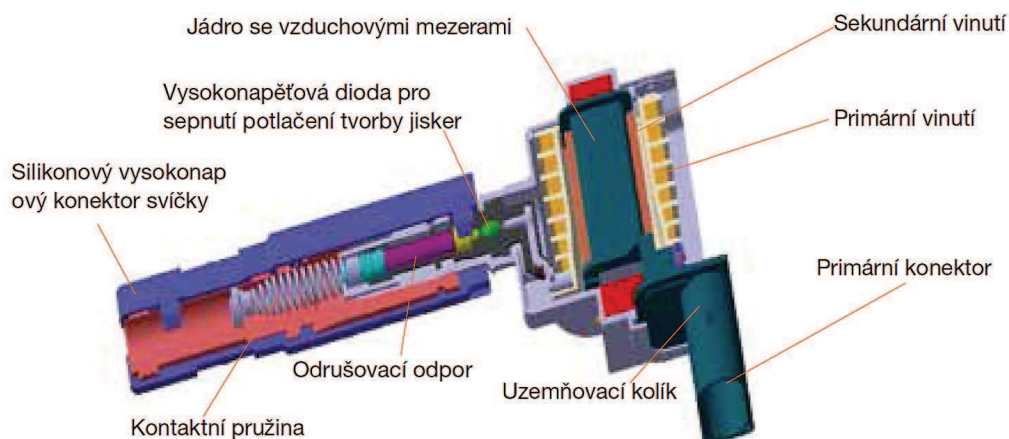
Obrázek 2.16: Optimalizované elektronické pole charakteristik předstihu (nahore) ve srovnání s polem charakteristik předstihu mechanického systému (dole) [50].

### Jednojiskrová zapalovací cívka

Jednojiskrová zapalovací cívka (schéma zapojení je na obrázku 2.17 a průřez cívkou na obrázku 2.18) obsahuje primární a sekundární vinutí. Proud primárním vinutím je spínán tranzistorem ovládaným pulzy z řídicí jednotky motoru. Vysoké napětí indukované v sekundárním vinutí je přiváděno na elektrody zapalovací svíčky přes vysokonapěťovou diodu. Při změně průtoku proudu primárním vinutím se v sekundárním vinutí indukuje napětí. Napětí indukované při přerušení proudu protékajícího primární cívkou se využije k přeskoku jiskry mezi elektrodami zapalovací svíčky. Napětí indukované v sekundárním vinutí při sepnutí tranzistoru je relativně nízké, přesto by v některých případech mohlo vyvolat nežádoucí předčasný přeskok jiskry, tj. předčasný zážeh. Předčasným přeskokům jiskry brání vysokonapěťová dioda zapojená v obvodu vysokého napětí.



Obrázek 2.17: Schéma zapojení jednojiskrové zapalovací cívky.



Obrázek 2.18: Průřez jednojiskrovou zapalovací cívku. [48]

Specifikace (a požadavky) jednojiskrové zapalovací cívky uváděná výrobcem Beru [48] je uvedena v tabulce 2.2 níže.

<b>Primární proud</b>	6 ÷ 20 A
<b>Doba nabíjení</b>	1,5 ÷ 4 ms
<b>Sekundární napětí</b>	25 ÷ 45 kV
<b>Doba trvání jiskry</b>	1,3 ÷ 2 ms
<b>Energie jiskry</b>	10 ÷ 140 mJ
<b>Proud jiskry</b>	80 ÷ 115 mA
<b>Odpor primárního vinutí</b>	0,3 ÷ 0,6 Ω
<b>Odpor sekundárního vinutí</b>	5 ÷ 20 kΩ

Tabulka 2.2 – Pokračování na další straně

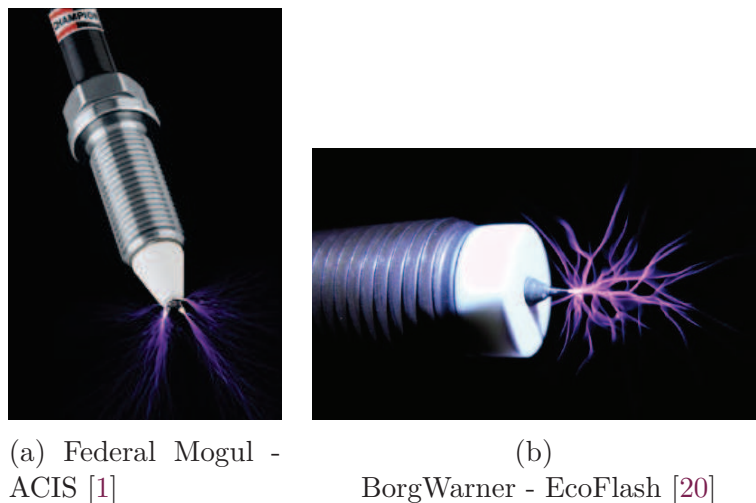
Tabulka 2.2 – Pokračování z předchozí strany

Počet závitů primární cívky	100 ÷ 250
Počet závitů sekundární cívky	10000 ÷ 25000

Tabulka 2.2: Specifikace jednojiskrové zapalovací cívky. [48]

### 2.3.2 Vysokofrekvenční zapalování

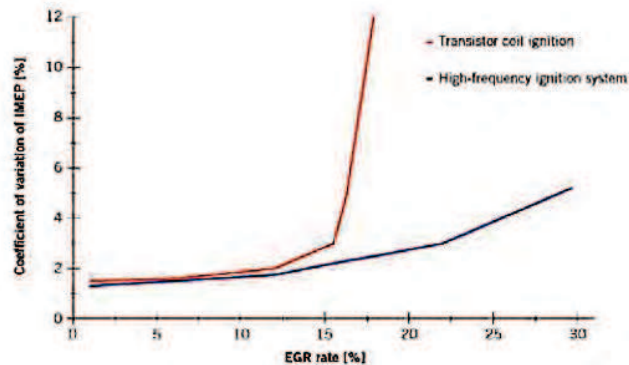
Koronový výboj se vytváří v silném a silně nehomogenním elektrickém poli, hoří v okolí hrotů a vodičů vysokého napětí. Ionizační procesy probíhají v malém tzv. koronálním objemu. Ve větší vzdálenosti od centra korony má výboj charakter temné oblasti a projevuje se pouze prskáním a syčením. [32] Charakteristické pro formu výboje jsou krátkodobě svítící rozvětvené kanálky viz. obrázku 2.19. Zápalné napětí korony závisí na špičatosti ostří. Korona se vytváří při stejnosměrném napětí na elektrodách, ale může hořet i při vysokofrekvenčním výboji. Při koronovém výboji dochází k rozkladu plynů a generaci ozónu. [25]



Obrázek 2.19: Vysokofrekvenční zapalovací systémy s koronovým výbojem.

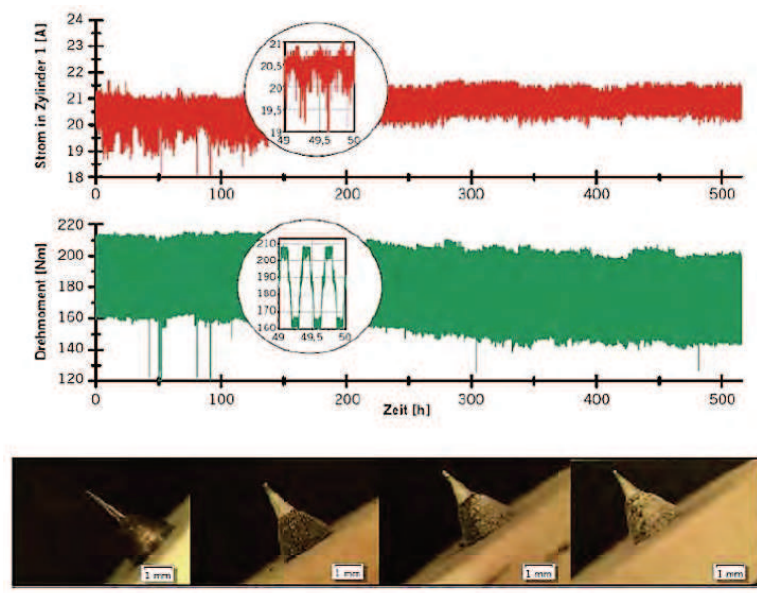
Vysokofrekvenční zapalovací systém založený na principu koronového výboje bývá obchodně označován jako ACIS (Advanced Corona Ignition System [1]) případně EcoFlash [20]. Výrobci zmíněných zapalovacích systémů zmiňují snížení spotřeby paliva až o 10% a s tím spojenou nižší produkci CO<sub>2</sub> [1], možnost zvýšení podílu recirkulovaných plynů (EGR) na cca 30% viz. obrázek 2.20, což je o cca 13% více oproti standardnímu zapalovacímu systému. Rovněž je zmíněna schopnost zážehu chudé palivovzdušné směsi s  $\lambda \div 2$ . [12] Výrobce také uvádí zkrácení doby průtahu zážehu o 5 až 20° pootočení klikového hřídele a zkrácení doby potřebné pro vyhoření

5 až 90% obsahu náplně válce o cca 5 až 10%, což odpovídá cca 2 ÷ 3,5° pootočení klikového hřídele [20].



Obrázek 2.20: Porovnání možností zvýšení podílu recirkulovaných plynů (EGR) u konvenčního (tranzistorového) zapalování o energii 90 mJ (TCI) a systému vysokofrekvenčního zapalování EcoFlash (HFIS) (při 2000 1/min a  $p_i = 6$  bar) [20]

Stejně jako u klasických zapalovacích svíček dochází postupem času k opotřebení elektrod (střední a vnější/ch), podobný problém nastává i u vysokofrekvenčního zapalovacího systému - resp. na elektrodě, jak ukazuje obrázek 2.21.



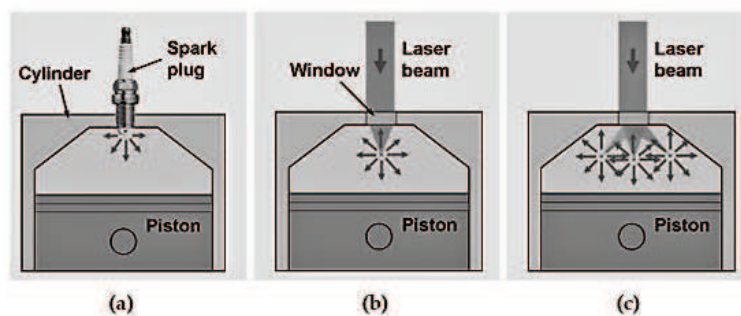
Obrázek 2.21: Průběh primárního proudu vysokofrekvenčního zapalovacího systému a točivého momentu motoru v závislosti na čase a tomu odpovídající snímky opotřebení v čase 0, 150, 320 a 480 hodin. [20]

Využití vysokofrekvenčního zapalování v běžné praxi nebylo v dostupné literatuře dohledáno.



### 2.3.3 Laserové zapalování

Způsob zapálení palivovzdušné směsi pomocí laserového paprsku je znám od 70. let 20. století. Použití mimo laboratorní prostředí doposud nebylo možné z důvodů technických, ekonomických a dále pak rovněž díky rozměrové náročnosti takového zapalovacího systému. Obrázek 2.22 schematicky zobrazuje možnosti zážehu palivovzdušné směsi PSM.



Obrázek 2.22: Schematické zobrazení možností zážehu palivovzdušné směsi: a) pomocí zapalovací svíčky, b) pomocí laserového paprsku, c) vícenásobné pomocí laserového paprsku. [43]

Zážeh palivovzdušné směsi pomocí laseru je možné oproti zážehu pomocí zapalovací svíčky v kratším čase (řádově  $10^{-9}$ s oproti řádově  $10^{-3}$ s). Další uváděnou výhodou je možnost zážehu chudé palivovzdušné směsi ( $\lambda > 1$ ) [43] - to vede zejména ke snížení produkce  $\text{NO}_x$  ve výfukových plynech, což odstraňuje problém s ekonomicky nákladnými systémy úprav výfukových plynů. Dále pak možnost přesného zacílení paprsku laseru ve spalovacím prostoru tak, aby výsledná plazma zapálila palivovzdušnou směs. Na rozdíl od klasických zapalovacích systémů je potřebná minimální energie k zažehnutí palivovzdušné směsi se zvyšujícím se tlakem klesající. Nespornou výhodou laserového zapalování je možnost zažehnout palivovzdušnou směs kdekoli uvnitř spalovacího prostoru, nikoliv pouze bodově jako u klasického zapalovacího systému. Tím je možné palivovzdušnou směs zažehnout dále od studených stěn válce (plamen se od počátku neochlazuje a může se šířit rovnoměrněji). Experimenty byly provedeny především na zážehových motorech s použitím plynného paliva -  $\text{CH}_4$  [38] nebo  $\text{C}_3\text{H}_8$  [43].

V tabulce na obrázku 2.23 je porovnána pravděpodobnost zapálení směsi paliva (propan  $\text{C}_3\text{H}_8$  se vzduchem) pomocí laserového zapalování a zapalovací svíčky při různých hodnotách dodané energie zapalovacím systémem. Z přehledu je patrné, že oproti klasickému zapalovacímu systému je možné pomocí laserového zapalování spolehlivě zažehnout i palivovzdušnou směs s  $\lambda < 1$ . Palivovzdušná směs s  $\lambda = 0,88$  byla zažehnuta pomocí 5ti laserových pulzů o optické energii 13 mJ. Zažehnutí palivovzdušné směsi pomocí klasického zapalovacího systému bylo spolehlivě možné pouze pro  $\lambda = 1$  (pro  $\lambda = 0,97$  byla pravděpodobnost zážehu pouze 33%).

C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> +Air		Laser					Spark Plug
		1 pulse (3.0mJ)	2 pulses (5.6mJ)	3 pulses (8.1mJ)	4 pulses (10.6mJ)	5 pulses (13.0mJ)	
ER	A/F						
1.00	15.2	100	100	100	100	100	100
0.97	15.7	0	50	100	100	100	33
0.93	16.3	-	0	100	60	100	0
0.88	17.2	-	-	22	0	100	-
0.84	18.1	-	-	-	0	0	-

Obrázek 2.23: Porovnání zapalovací schopnosti palivovzdušné směsi pomocí laserového zapalování a zapalovací svíčky. [43]

Laserové zapalovací systémy v současné době využívají zatím jediný druh laseru, kterým je Nd:YAG/Cr<sup>4+</sup>. Zkratka YAG pochází z anglického Yttrium aluminium garnet, což znamená yttrito hlinitý granát (Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>). Typická vlnová délka emitovaného záření je 1064 nm. S menší účinností však může emitovat i záření o jiných vlnových délkách jako například 946, 1120, 1320 a 1440 nm. Buzen bývá nejčastěji xenonovou výbojkou nebo laserovou diodou (LD). [16] Je možné generovat záření jak v impulsním, tak i v kontinuálním režimu v závislosti na době buzení. V impulsním režimu se délka impulsu může v závislosti na druhu modulace jakosti rezonátoru pohybovat v rozmezí od milisekund až po jednotky pikosekund při použití tzv. Q-spínání (jedná se o metodu spínání, kdy laser dosahuje krátkých impulsů o špičkovém výkonu).

Problém, se kterým se potýkají vývojářské skupiny laserového zapalování je především velikost jednotlivých komponent. Vzhledem k tomu, že trend zážehových PSM je takový, že dochází ke snižování počtu válců a zdvihového objemu, je nutné přizpůsobit laserové moduly této skutečnosti a zástavbové rozměry v ideálním případě přiblížit na zástavbové rozměry zapalovací svíčky - viz. obrázek 2.24.



Obrázek 2.24: Porovnání klasické zapalovací svíčky se "svíčkou" laserovou. [11]

Využití laserového zapalování v běžné praxi nebylo v dostupné literatuře dohledáno.



## 2.4 Komůrkový zážeh

Komůrkový zážeh palivovzdušné směsi u zážehových motorů je v literatuře zmiňován a označován i jako nepřímý zážeh a v angličtině například jako flame-jet [19], jet-ignition [2, 3, 12] nebo chamber / prechamber ignition [8, 29]. Ve všech zmíněných případech je hlavním cílem takového řešení vyvolat zážeh palivovzdušné směsi poměrně malého objemu (v řádech jednotek % v porovnání se zdvihovým objemem jednoho válce) a touto hořící palivovzdušnou směsí (turbulentně proudící vně komůrky) zapálit palivovzdušnou směs zbývající. Rozdíl u jednotlivých řešení je ve způsobu přívodu paliva, resp. palivovzdušné směsi k zapalovací svíčce. V těchto případech lze rozdělit komůrkový zážeh na:

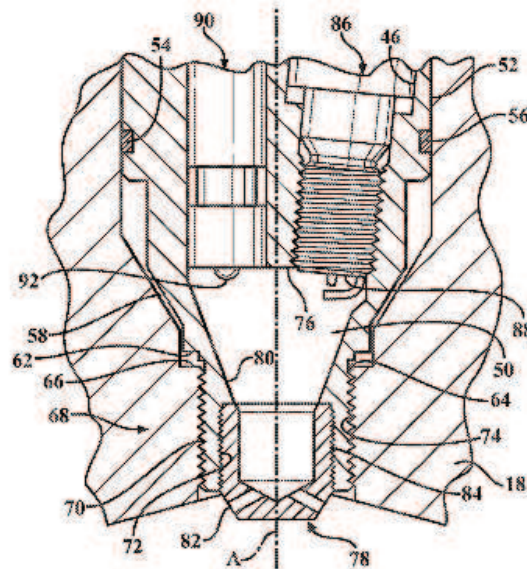
- "aktivní" s přívodem paliva do komůrky,
- "pasivní" s přívodem paliva vně komůrky a palivovzdušné směsi do komůrky pohybem pístu z dolní úvrati do horní.

Ve většině případů je zážeh palivovzdušné směsi pomocí komůrkového zážehu realizován u poměrně velkých (z hlediska zdvihového objemu) motorů. Z pohledu aplikace je pak realizován zejména u motorů průmyslových při provozu na zemní plyn. V kapitolách níže je podrobněji popsáno několik variant komůrkového zážehu palivovzdušné směsi. Komůrkovým zážehem se však zabývá a své výsledky publikuje několik dalších autorů. Například Heyne se ve své práci [18] zabývá komůrkovým zážehem (resp. autozážehem - tzn. bez zapalovací svíčky) pro motory určené pro kogenerační jednotky. K tomu využívá vyhřívané těleso komůrky instalované v hlavě válců. Autorský tým vedený Jamrozikem se ve své práci [24] zabývá numerickou simulací, za použití softwarového nástroje KIVA-3V, tzv. dvoustupňového hoření, které využívá lokálně bohatou palivovzdušnou směs ( $\lambda < 1$ ) v oblasti zapalovací svíčky pro zážeh chudé palivovzdušné směsi ( $\lambda > 1$ ) v hlavním spalovacím prostoru. Výsledky dalších prací publikují společně se Szwejzou [39]. Roethlisberger s Favratem porovnávají parametry na experimentálním motoru při provozu s komůrkovým zážehem oproti provozu bez komůrkového zážehu [35, 36]. Práce zabývající se komůrkovým zážehem palivovzdušné směsi publikovali Takashima [40] a dále rovněž De Castro [8]. Tématem komůrkového zážehu palivovzdušné směsi u motoru při provozu na zemní plyn se rovněž zabýval Shah ve své disertační práci [37]. V dostupné literatuře nebylo dohledáno použití zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou bez přívodu paliva na zážehovém motoru při provozu na palivo BA95 (vyjma krátké zmínky o použití řešení s přívodem paliva do komůrky v [27]). V následujících podkapitolách níže jsou podrobněji uvedeny příklady řešení komůrkového zážehu od různých výzkumných týmů a výrobců.

### 2.4.1 Mahle - Turbulent Jet Ignition

V roce 2010 představil William Attard výsledky výzkumných prací [3] svého týmu a představil tzv. systém turbulent jet ignition (TJI) určený pro zážehové spalovací motory. Tento systém pro zážeh palivovzdušné směsi disponuje dvěma přívodními

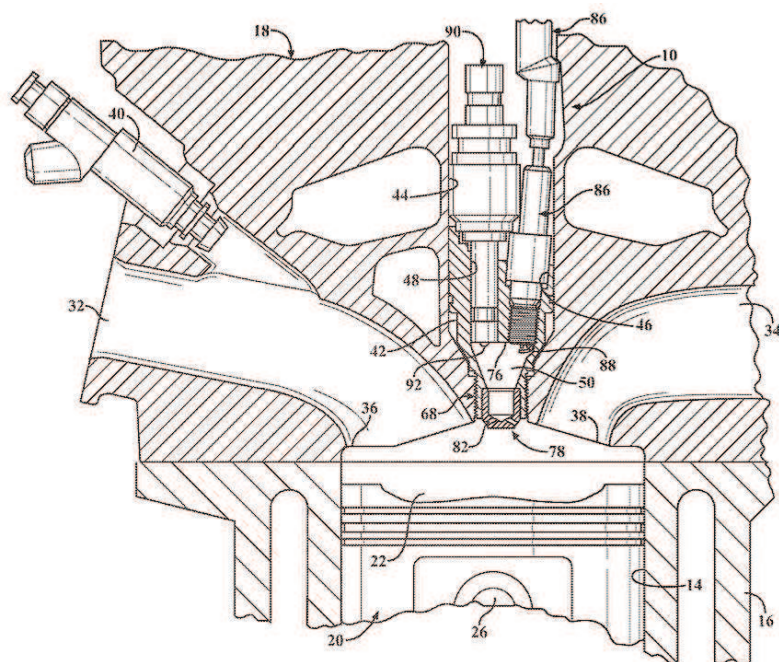
místa paliva resp. palivovzdušné směsi. Hlavní přívod paliva je přiváděn před sací ventil PSM, sekundární (menší dávka) přívod paliva je přiváděn do tzv. předkomůrky, kde je rovněž umístěna zapalovací svíčka. Malé množství palivovzdušné směsi zažehnuté v předkomůrce poté slouží k zážehu palivovzdušné směsi v hlavním objemu, tedy uvnitř válce. V současné době je tento systém vyráběn firmou Mahle GmbH. (Firma Mahle rovněž uvádí, že toto řešení pro zážeh chudé palivovzdušné směsi ( $\lambda > 1$ ) používá u motorů v závodních vozech Ferrari F1 [27].)



Obrázek 2.25: Detailní pohled na systém Mahle-TJI obsahující v integrovaném modulu zapalovací svíčku (88), sekundární přívod paliva (90), předkomůrku (50) a výtokové otvory (82). [3]

Tento modul poměrně kompaktních rozměrů (viz. obrázek 2.25) je zpravidla umístěn mezi sací a výfukový ventil a v celkové sestavě je umístěn místo klasické zapalovací svíčky. Objem předkomůrky činí cca  $1,3 \text{ cm}^3$ , což představuje přibližně 2% kompresního objemu. Přívod paliva přes hlavní vstřikovač musí zajistit dodávku paliva tak, aby bylo dodáno cca 98% potřebné energie. Experimenty byly prováděny na experimentálním jednoválcovém motoru vybaveném čtyřventilovou technikou. Kompresní poměr činil 10,4:1, maximální udávaná tepelná účinnost byla 42% s velmi nízkými hodnotami emisí  $\text{NO}_x$ . Celkový zdvihový objem činil  $0,6 \text{ dm}^3$ , koncová část předkomůrky obsahuje 6 otvorů o průměru 1,25mm a délce 3mm (koncovou část s otvůrkou je možno pro experimenty zaměnit za část o jiném počtu otvůrků, případně jiným počtem otvůrků a pozměněnou geometrií koncové části, která zasahuje do spalovacího prostoru [41]). Poměrně malá velikost otvorů způsobuje velmi rychlý průchod zažehnuté palivovzdušné směsi v předkomůrce skrze tyto otvory. Produkty spalování vstupující do hlavního spalovacího prostoru připravenou palivovzdušnou směs v tomto prostoru zažehují pomocí chemického, tepelného a turbulentního působení. Takovýto způsob zážehu připravené palivovzdušné směsi umožňuje (dle autorů) snížení spotřeby paliva až o cca 30% v porovnání s běžným způsobem zážehu

palivovzdušné směsi.



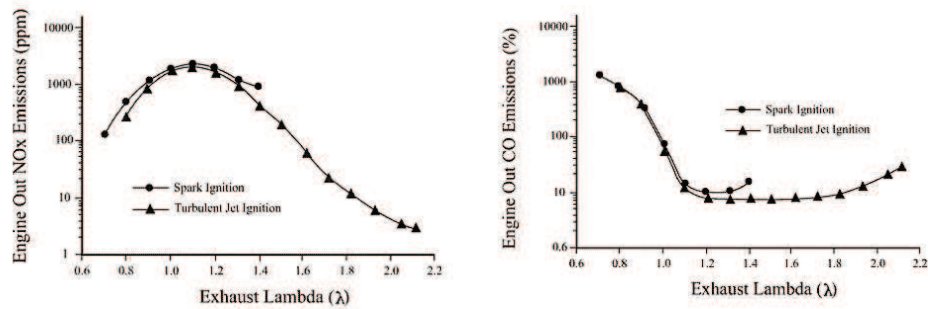
Obrázek 2.26: Řez motorem s instalovaným systémem Mahle-TJI. [3]

Obrázek 2.26 zobrazuje částečný řez, kde je zobrazen blok motoru (16), hlava válců (18), přívod paliva (40) a systém TJI (10) namontovaný do otvoru (44) v hlavě válců. Zobrazen je spalovací prostor (22), píst (20) umístěný ve válci (14), kanál (32) před sacím ventilem (36) a kanál (34) za výfukovým ventilem (38).

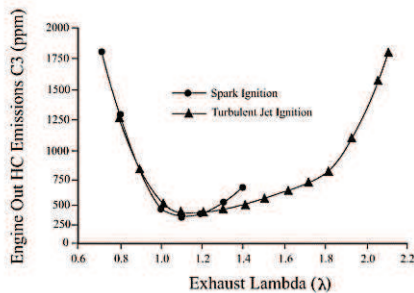
Na obrázku 2.25 je detailnější zobrazení konstrukce systému TJI. Systém je uložen v jeden kompaktní celek, který obsahuje zapalovací svíčku (86), vstřikovač paliva (90), předkomůrku (50) a koncovou část (82) opatřenou několika otvůrkou pro výtok zažehnuté palivovzdušné směsi do spalovacího prostoru. Těsnění mezi modulem TJI (10) a hlavou válců zajišťuje podložka na rovné dosedací ploše (66). Modul je instalován do hlavy válců (18). Mezi modulem TJI a hlavou válců je rovněž použito O-kroužku k dotěsnění (56).

Výhoda způsobu zážehu palivovzdušné směsi systémem TJI oproti klasickému zážehu spočívá zejména v tom, že je možné bezpečně a spolehlivě zažehnout velmi chudou palivovzdušnou směs až o  $\lambda=2,1$ , kdežto u klasického zážehu je možné dosáhnout spolehlivého zážehu palivovzdušné směsi o  $\lambda$  cca 1,6 převážně však v oblasti stechiometrické palivovzdušné směsi, tedy při hodnotě  $\lambda=1$ .

Obrázky níže (2.27) zobrazují rozdíly v produkci škodlivých emisí CO, HC a NO<sub>x</sub> u motoru se způsobem zážehu palivovzdušné směsi pomocí TJI oproti klasickému zážehu palivovzdušné směsi. Možnost zážehu palivovzdušné směsi s poměrně vysokým obsahem zbytkového vzduchu, tedy  $\lambda > 1$  a tím pádem nižší maximální teplotě při spalování, stojí za velmi nízkou produkcí oxidů dusíku NO<sub>x</sub> (hodnoty kolem 10ppm při  $\lambda \div 2$ ). Snížení produkce škodlivých emisí bylo rovněž prokázáno u nespálených uhlovodíků (HC) a oxidu uhelnatého (CO).



(a) Produkce oxidů dusíku NO<sub>x</sub>. (b) Produkce oxidu uhelnatého CO.



(c) Produkce nespálených uhlovodíků HC.

Obrázek 2.27: Produkce složek škodlivých výfukových emisí při provozu motoru se systémem zážehu palivovzdušné směsi TJI a při provozu motoru s klasickým zapalovacím systémem v závislosti na bohatosti palivovzdušné směsi  $\lambda$ . [3]

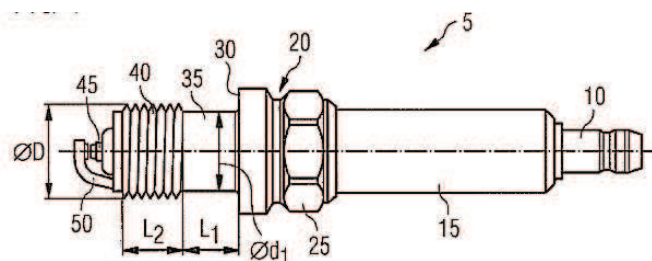
Tým Williama Attarda se ve své práci [2] rovněž zaměřil na vizualizaci hoření uvnitř spalovacího prostoru. Ke svým experimentům využili tzv. transparentní motor [26], pro záznam průběhu hoření využili vysokorychlostní kameru. V práci se zaměřili na porovnání klasického zapálení palivovzdušné směsi pomocí zapalovací svíčky se zapálením palivovzdušné směsi pomocí systému TJI vždy za srovnatelných podmínek (stejný otáčkový režim, stejné zatížení). Přehledová tabulka z provedených experimentů na obrázku 2.28 ukazuje snížení mezicyklové variability středního indikovaného tlaku u systému Mahle-TJI i při zvýšení  $\lambda$  na hodnotu 1,8.

Spark Ignition (Baseline)					Jet Ignition
Engine Speed (rev/min)	1500				1500
Load (IMEPn) (bar)	3.3				3.3
Lambda ( $\lambda$ )	1	1.2	1.4	1.5	1.8
Spark Timing (deg. BTDC)	18	20	24	25	17
CoV IMEPg (%)	2.3	2.5	2.5	4	1.0
CA50 (deg. ATDC)	8	7	7	8	7
Pressure Rise Rate (bar/deg.)	1.2	1.1	1.0	0.8	1.1

Obrázek 2.28: Porovnání klasického zapálení palivovzdušné směsi pomocí zapalovací svíčky se zapálením palivovzdušné směsi pomocí systému TJI. [2]

## 2.4.2 MWM GmbH

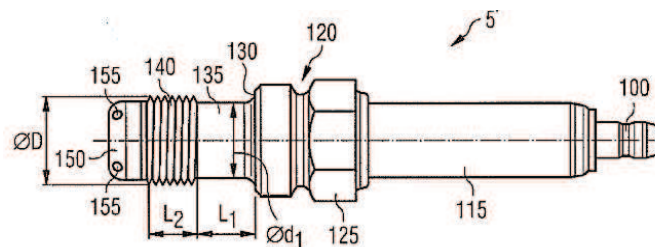
Společnost MWM GmbH uvedla v roce 2014 patent [29] komůrkového způsobu zážehu palivovzdušné směsi. Řešení od firmy MWM GmbH se vyznačuje především tím, že je možné nahradit klasickou zapalovací svíčkou svíčkou umožňující zážeh palivovzdušné směsi v předkomůrce bez jakékoliv dodatečné konstrukční úpravy. Toto řešení je vhodné pro motory, v jejichž hlavě válců je umístěn závitový otvor pro zapalovací svíčku o rozměru alespoň M14 a maximálně M30 (v případě větších závitových otvorů je nutné pro instalaci použití adaptéru). Tento typ zapalovací svíčky může být využíván pro spalování zemního plynu, břidlicového plynu, důlního plynu, bioplynu, skládkového plynu nebo splaškových plynů. Přívod palivovzdušné směsi (přívod paliva je realizován vně komůrky) do komůrky je vyvolán pohybem pístu z dolní úvratí do horní. Zapálená palivovzdušná směs (resp. produkty hoření) vstupují z komůrky do hlavního spalovacího prostoru, kde zažehují zbytek připravené palivovzdušné směsi.



Obrázek 2.29: Zapalovací svíčka od firmy MWM GmbH. [29]



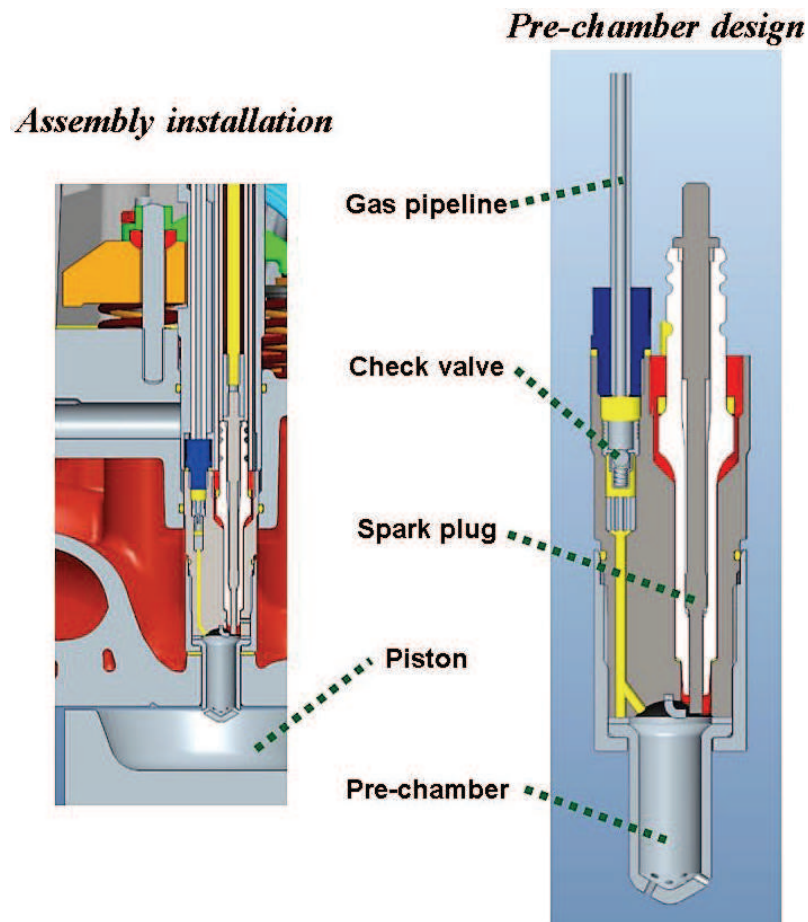
Obrázek 2.29 zobrazuje zapalovací svíčku (5) s konektorem pro připojení vysokonapěťového modulu (10), keramickým izolátorem (15), střední (45) a vnější elektrodou (50). Vnější část (20) je opatřena šestihranem (25) určeným pro montáž, dosedací těsnicí plochou (30), mezilehlou válcovou částí bez závitů (35) a koncovou částí s vnějším závitěm (40), pomocí které je zapalovací svíčka našroubována do závitového otvoru v hlavě válců (shodné pro obě varianty zapalovacích svíček MWM). Obrázek 2.30 ukazuje zapalovací svíčku opatřenou předkomůrkou (150). Předkomůrka je součástí zapalovací svíčky a disponuje jedním nebo více otvůrkami (155).



Obrázek 2.30: Zapalovací svíčka s předkomůrkou od firmy MWM GmbH. [29]

### 2.4.3 Komůrkový zážeh ČVUT

Komůrkovým zážehem palivovzdušné směsi se dlouhodobě zabývá tým pracovníků na ČVUT v Praze. Celkový návrh je řešen tak, aby objem komůrky činil cca 2% objemu hlavního spalovacího prostoru - to odpovídá cca  $33\text{cm}^3$  (u motoru, na kterém jsou experimenty realizovány). V hlavním tělese navrhovaného řešení je instalována klasická zapalovací svíčka. Do tělesa je rovněž přiváděno veškeré palivo (v tomto případě zemní plyn), jehož přívod je opatřen navrženým zpětným ventilem. Koncová část komůrky (poslední známá varianta [22]) je opatřena celkem 12ti výšlehovými otvůrkami, které jsou umístěny ve dvou úrovních se vzájemným pootočením (při pohledu zdola) o  $30^\circ$ . Vrcholový úhel otvůrků v nejspodnější partii je  $60^\circ$ , vrcholový úhel zbývajících 6ti otvůrků umístěných výše činí  $120^\circ$ . Průměr všech 12ti otvůrků je 1,2mm. Jako jedna z hlavních výhod tohoto řešení je uváděna možnost snížení produkce oxidů dusíku  $\text{NO}_x$  ve výfukových plynech na takovou úroveň, že motor bude splňovat normu EURO VI i bez nutnosti použití přídatného systému pro úpravu výfukových plynů.

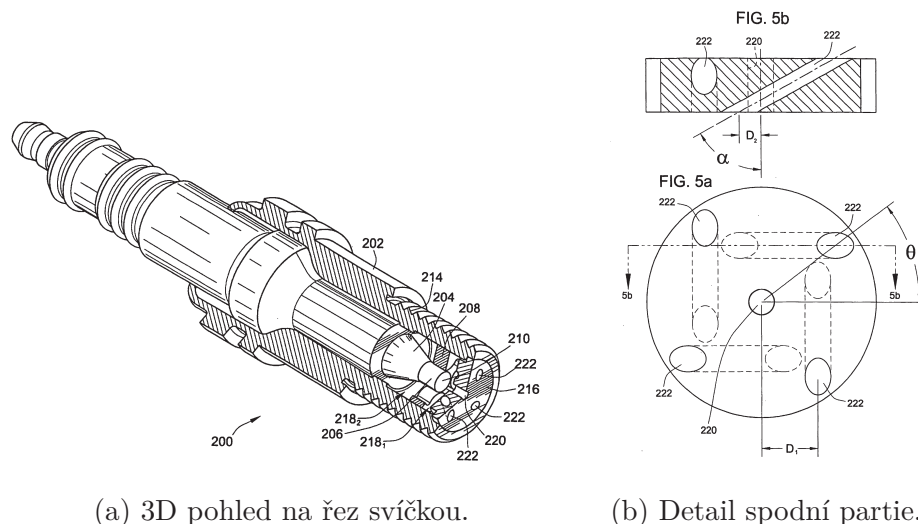


Obrázek 2.31: Návrh řešení komůrkového zážehu na ČVUT v Praze. Zdroj: ČVUT v Praze.

#### 2.4.4 Zapalovací svíčka s komůrkou

V roce 2005 pánové Tozzi a Salter nechali patentovat zapalovací svíčku s předkomůrkou určenou pro zážeh velmi chudých palivovzdušných směsí u motorů provozovaných na plynné palivo [42]. Patentované řešení, stejně jako řešení uvedené v [29] je navrženo jako řešení s pasivním přívodem paliva (resp. palivovzdušné směsi), kdy je palivo přiváděno vně komůrky a přívod palivovzdušné směsi do komůrky je vyvolán pohybem pístu z dolní úvrati do horní. Obrázek 2.32 níže zobrazuje patentové nákresy svíčky, kde je zobrazeno hlavní těleso svíčky (202), ve kterém je izolátor se střední elektrodou (206) a zobrazena je rovněž komůrka (208) a spodní část (216) s výšlehovými otvůrkami (222).





(a) 3D pohled na řez svíčkou.

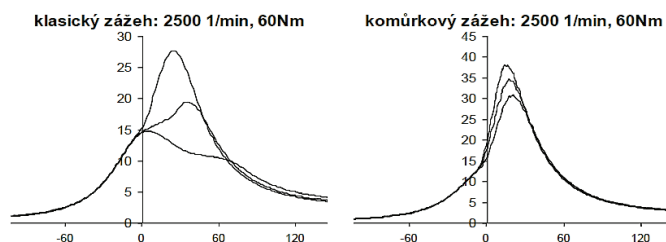
(b) Detail spodní partie.

Obrázek 2.32: Zapalovací svíčka s komůrkou - zobrazení řezu modelu ve 3D pohledu a detailní partie spodní části zaměřené na výtokové otvůrky. [42]

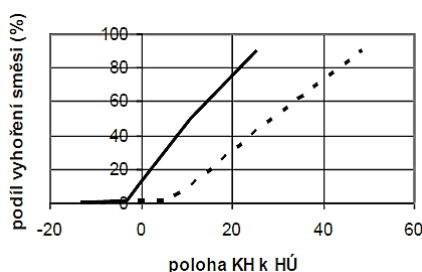
## 2.5 Současný stav problematiky na TUL

Na Katedře vozidel a motorů (KVM) Technické univerzity v Liberci (TUL) je dlouhodobě řešena problematika průběhu hoření palivovzdušné směsi v PSM pomocí tzv. komůrkového zážehu (resp. výzkum zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou - ZSIK). Tímto tématem se rovněž zabýval Blažek ve své disertační práci [6].

V interních dokumentech KVM je uvedeno, že experimentální výzkumný program (na KVM TUL) k ověření efektu chráněného prostoru kolem elektrod zapalovací svíčky v komůrce, kde se zlepšují podmínky pro rozvoj ohniska zážehu a hoření palivovzdušné směsi v komůrce a výtokem spalin a hořící palivovzdušné směsi z komůrky do spalovacího prostoru ve válci motoru se urychlí průběh hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru, byl v 1. etapě (která probíhala v letech 2002 - 2006) prací realizován pouze na jednom válci benzinového i plynového motoru. Výsledek potvrdil, že ve způsobu zážehu palivovzdušné směsi ve válci motoru je významný potenciál s reálnými možnostmi pro další zlepšování parametrů dnešních zážehových motorů. Rozdíl mezi proměnlivostí průběhů tlaku ve válci (tzv. mezicyklovou variabilitou) zážehového motoru se standardním zážehem a komůrkovým zážehem zřetelně ukazuje obrázek 2.33. Na obrázku 2.34 je porovnání středních hodnot průběhu vyhořívání náplně válce pro režimy z 2.33.



Obrázek 2.33: Porovnání průběhů tlaku ve válci benzinového motoru ( $V_{Z1}=0,35$  dm<sup>3</sup>, připravená homogenní palivovzdušná směs  $\lambda=1$ , elektronické řízení) při standardním zážehu a zážehu pomocí „skládané“ zapalovací komůrky (objem komůrky 1,65 cm<sup>3</sup>, přívod palivovzdušné směsi do komůrky z válce při kompresi). Průběhy tlaku z pracovních oběhů s nejvyšší, střední a nejnižší hodnotou  $p_{max}$  ze souboru 150 po sobě následujících pracovních cyklů motoru. Zdroj: interní dokumenty KVM.



Obrázek 2.34: Průběhy vyhořívání palivovzdušné směsi ve válci motoru při zážehu klasickou ZS (čárkovaně) a komůrkovým zážehem (plná čára). Zjištěné parametry průběhů hoření jsou z termodynamické analýzy změřených průběhů tlaku a statistického zpracování parametrů hoření ze stejného souboru měření jako průběhy tlaků na 2.33. Zdroj: interní dokumenty KVM.

Výzkumný program komůrkového zážehu výsledkem hořící palivovzdušné směsi z komůrky byl na KVM iniciován poznatky a údaji z odborné literatury (např. [19]) a od počátku byl orientován na vozidlové zážehové motory s vnějším tvořením stechiometrických palivovzdušných směsí, přičemž vlastní konstrukce zapalovacích komůrek byly od počátku postaveny na plnění komůrky čerstvou palivovzdušnou směsí z válce motoru při kompresním zdvihu (tj. bez speciálního samostatného přívodu paliva do komůrky). Zdroj: interní dokumenty KVM.

## 2.6 Cíle disertační práce

Z poznatků studia o současném stavu problematiky byly stanoveny cíle disertační práce.

Cílem disertační práce je studium průběhu spalování připravené palivovzdušné směsi v zážehovém motoru zaměřený především na posouzení vlivu konstrukčního provedení zapalovací svíčky na počáteční rozvoj hoření s následným přechodem do hlavní fáze hoření. Kritériem bude variabilita jak charakteristických ukazatelů průběhu hoření, tak parametrů pracovního oběhu motoru.

Dílčí cíle disertační práce jsou následující:

- Sledování průběhu přípravy a hoření palivovzdušné směsi v zážehových PSM s využitím moderních metod měření (stanovení podmínek pro správné využití přístrojové techniky a metod, možnost realizace experimentálního zařízení pro měření úrovně ionizace připravené palivovzdušné směsi ve válci zážehového motoru).
- Hodnocení vlivu různého konstrukčního provedení klasické zapalovací svíčky na zážeh palivovzdušné směsi na parametry hoření a pracovního oběhu a na provozní, výkonové a emisní parametry zážehového motoru.
- Studium efektu komůrkového zážehu palivovzdušné směsi pomocí zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou (bez samostatného přívodu paliva) na parametry hoření, pracovního oběhu a zážehového motoru. Problémy zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou a možné konstrukční varianty tohoto provedení zapalovací svíčky.
- Vyšetřování tepelného zatížení pouzdra zapalovací svíčky a střední elektrody vystavené přímým účinkům vysokých teplot náplně válce při hoření (měření teplot v nejspodnější části pouzdra zapalovací svíčky, modelování teplotního pole pomocí dostupného SW). Srovnání teplotního pole klasické zapalovací svíčky a zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou.
- Shrnutí poznatků, možnosti pro zlepšení průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci zážehového motoru a provozních vlastností vozidlového zážehového motoru.

Následující kapitoly a podkapitoly předkládané disertační práce popisují experimentální výzkum a vývoj zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou, realizovaný v období 2012-2014 na školicím pracovišti KVM TU v Liberci v programu pracovního balíčku WP02 Centra Kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka (CKA-PJB) a v období 2015-2017 v projektu LO1201-CZ.1.05/2.1.00/01.0005 Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace na TU v Liberci. V celém období 2012-2017 měl disertant na realizaci programu celého experimentálního výzkumu rozhodující podíl.

## 3 Zařízení použitá k experimentům

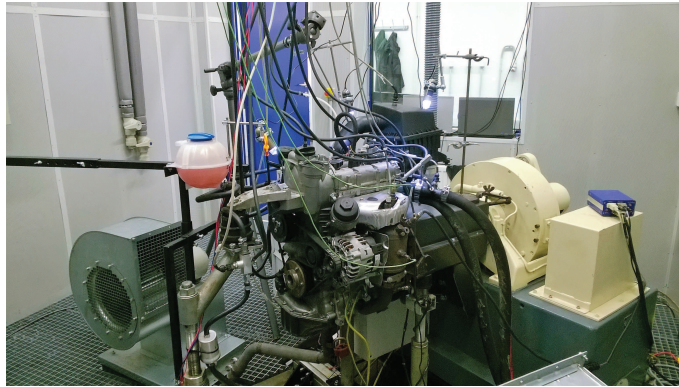
Kapitola popisuje použitou měřicí aparaturu a techniku, která byla použita pro experimentální práce a také zmiňuje nutné přípravné práce nezbytné pro provedení experimentů.

### 3.1 Motorové brzdové stanoviště

Pro experimenty bylo využíváno motorové brzdové stanoviště osazené vířivým dynamometrem o obchodním označení Schenck WT 150, který je určen pro spalovací motory o:

- maximálním výkonu 132 kW,
- maximálním točivém momentu 350 Nm a
- maximálních otáčkách 8000 1/min.

Používané motorové stanoviště umožňuje rovněž gravimetrické měření spotřeby paliva pomocí spotřeboměru AVL Dynamic fuel meter 733. Technicky je možné na daném stanovišti použít i různá paliva (standartně benzin BA95 případně BA98, motorovou naftu, případně LPG nebo CNG o tlaku 20 a 200 bar) s externím měřením přebytku kyslíku ve výfukových plynech  $\lambda$  (pomocí  $\lambda$  metru výrobce ETAS). Dané stanoviště je vybaveno teplotní stabilizací provozních médií motoru (chladičí kapalina, olej, palivo, nasávaný vzduch). Ovládání je prováděno pomocí zařízení Simatic s řídicím a měřicím systémem CMS<sup>®</sup> pracujícím pod OS Windows s frekvencí řízení a plně automatizovaným sběrem dat o frekvenci 1Hz.



Obrázek 3.1: Pohled na motorové brzdové stanoviště WT150 s instalovaným motorem EA111.03E.

Veškeré experimenty byly provedeny na zkušebním motoru připraveném ze sériového motoru EA111.03E, který poskytl výrobce Škoda auto a.s.. Parametry motoru používaného pro experimenty jsou uvedeny v tabulce 3.1 níže.

<b>Typ motoru</b>	zážehový, 12ti ventilový rozvod DOHC
<b>Vrtání X Zdvih</b>	76,5 x 86,9 mm
<b>Počet válců</b>	3, řadový
<b>Zdvihový objem</b>	1198 cm <sup>3</sup>
<b>Maximální výkon</b>	51 kW při 5500 1/min
<b>Maximální točivý moment</b>	112 Nm při 3700 1/min
<b>Kompresní poměr</b>	10,5±0,3 : 1
<b>Tvorba směsi</b>	vnější (MPI)
<b>Typ chlazení</b>	kapalinové
<b>Úprava výfukových plynů</b>	3-cestný katalyzátor

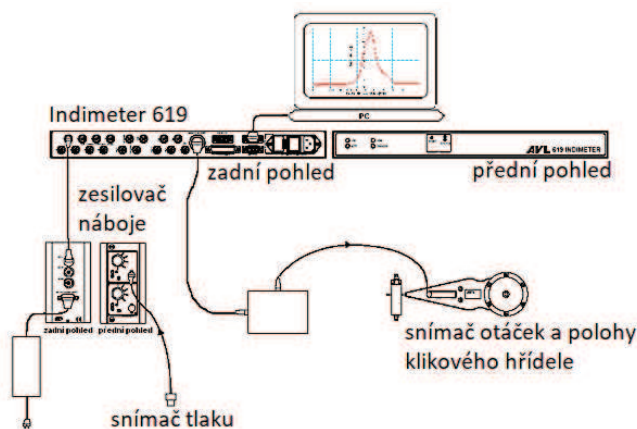
Tabulka 3.1: Parametry zážehového motoru EA111.03E používaného pro experimenty.

## 3.2 Indikační aparatura

Ve všech měřených režimech byla prováděna vysokotlaká indikace (ve všech válcích motoru) pomocí indikační aparatury AVL Indimeter 619 (sestavající ze zesilovače náboje, snímače otáček a polohy klikového hřídele a piezoelektrických snímačů tlaku GU21D) od firmy AVL Graz. Zaznamenané indikátorové diagramy následně posloužily pro termodynamickou analýzu změřených průběhů tlaku ve válcích motoru a pomocí SW AVL Concerto byly statisticky vyhodnoceny parametry pracovního

oběhu motoru a parametry průběhů hoření při zážehu palivovzdušné směsi. Zařízení pro indikaci tlaků AVL Indimeter 619 (disponující 8 vstupními kanály) může být rovněž využíváno k:

- monitorování tlaku ve válci a analýzu spalování – vysokotlaká indikace do 250 bar ve válci s analýzou průběhu parametrů spalování, do 300 MPa v palivových systémech common-rail,
- monitorování tlaku v sacím (i výfukovém) potrubí – nízkotlaká indikace,
- použití jak pro benzínové, tak i dieselové motory,
- získání: nejvyšší tlak, střední indikovaný tlak, rychlost hoření, atd.,
- porovnání záznamů s různými druhy motorů a časovým rozdělením,
- statistické vyhodnocení a off-line prohlížení výsledků - pomocí SW AVL Con-certo.



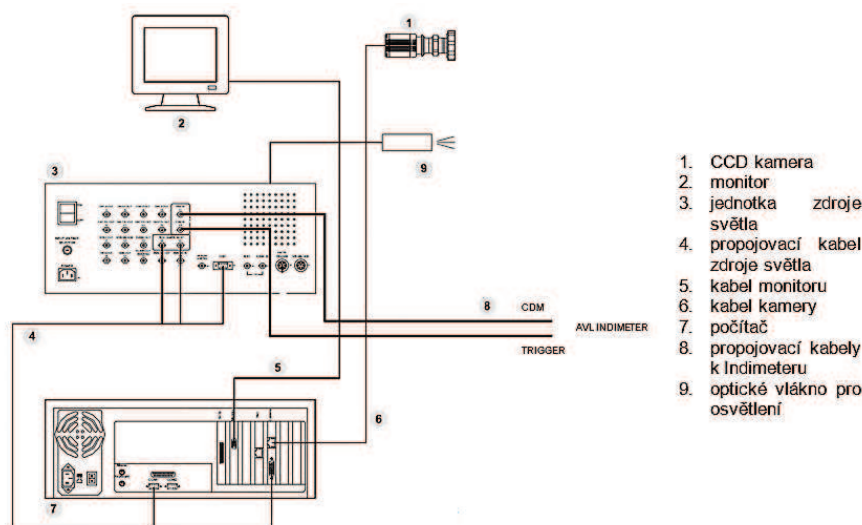
Obrázek 3.2: Schéma zapojení zařízení pro analýzu tlaků – Indimeter 619. [6]

### 3.3 Vizualizační technika

Zařízení AVL VisioScope (s příslušenstvím) umožňuje zobrazit a opticky sledovat děje ve spalovacím prostoru PSM, případně v sacím i výfukovém potrubí zážehových i vznětových motorů.

Vizualizační systém Visioscope od firmy AVL pracuje s elektronickým snímáním, přenosem a zpracováním obrazu tak, že uživatelem zvolenou frekvencí se postupně zaznamenává obraz ve válci motoru v jednotlivých polohách klikového hřídele (z tohoto důvodu je systém napojen na indikační aparaturu, ze které dostává informace o poloze klikového hřídele). Výsledný průběh sledovaného děje je tedy složen z obrazů zaznamenaných pro zvolenou oblast z různých pracovních cyklů motoru. Pro

záznam a vyhodnocení obrazového záznamu bylo využito nejnovější verze SW AVL Visioscope 1.5.



Obrázek 3.3: Schéma zapojení zařízení pro vizualizaci – Visioscope.

Pro vizualizaci hoření v zážehovém motoru používá AVL Visioscope kameru Di-CamPro (jejíž parametry jsou popsány v tabulce 3.2) s vysokou citlivostí, která pracuje pouze v černobílém módu a zaznamenaný snímek se pomocí speciálního SW AVL převádí do barevného formátu (změna obrazu z černobílého do barevného formátu je prováděna nastavením škály rozložení teplot v SW AVL. Je však ovlivněna i teplotním stavem ve válci motoru, který určuje základní barvu snímku. Tyto okolnosti se projevují v barevných odlišnostech snímků pro různá zatížení motoru.), který zřetelně ukazuje na teplotní změny při VN výboji (zážehu) a spalování palivovzdušné směsi.

Vzhledem k proceduře záznamu snímku v jednotlivých polohách KH a následnému ukládání dat do paměti jsou jednotlivé snímky pořizovány s relativně nízkou frekvencí a každý následný snímek je proto vždy z jiného pracovního cyklu motoru. K potlačení efektu proměnlivosti po sobě následujících pracovních oběhů (mezicyklové variability) lze volbou nastavení vizualizační aparatury pořizovat vícenásobný záznam snímků pro stejnou polohu klikového hřídele a statistickým zpracováním zaznamenaných dat se vytvoří „průměrný“ snímek pro každou polohu klikového hřídele. Z takto zpracovaných záznamů potom vznikne vizualizace průběhu hoření, ze které lze vybírat samostatné snímky pro jednotlivé polohy klikového hřídele.

### 3.3.1 Endoskopy

Zmíněná vizualizační technika využívá dvou základních typů endoskopů (dle aktuální aplikace). Základní rozdělení lze provést například takto:

- Chlazený endoskop  
 Endoskop určený pro sledování dějů ve válci motoru a to za chodu motoru.



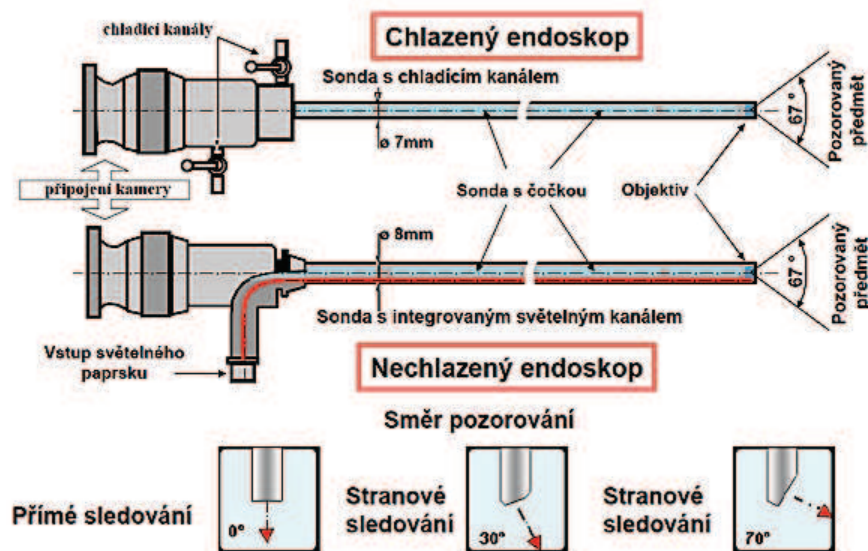
V endoskopu jsou integrované chladičí kanály pro přívod chladičího vzduchu (musí splňovat parametry na čistotu a vlhkost předepsané výrobcem), který je připojen přímo na endoskop. Endoskop je následně vložen do pouzdra, které je zakončeno "ampulkou" z křemenného skla a která vyčnívá do spalovacího prostoru daného motoru (její hlavní funkcí je ochrana optiky umístěné v koncové části endoskopu). Chlazený endoskop je poměrně malého průměru (4mm).

- Endoskop s osvětlením



Endoskop s osvětlením je určen pro sledování dějů v prostorech s nízkým teplem namáháním (do maximálně 150°C). V tělese nechlazeného endoskopu je zabudován světlovod pro vedení intenzivního bílého světla z řídicí jednotky systému Visioscope do těžko přístupných míst, které je nezbytné pro záznam probíhajících dějů. Z důvodu integrovaného světlovodu v tělese endoskopu je toto těleso oproti endoskopu chlazenému většího průměru (8mm).

Obě varianty endoskopů mají koncovou část s optikou objektivu uzpůsobenou jak pro přímé sledování (tedy s úhlem odklonu od svislé osy endoskopu 0°) nebo pro sledování stranové s úhly odklonu od svislé osy endoskopu buď o 30° nebo o 70° (případně 60°). Zorné pole optiky je ohraničeno kuzelem o vrcholovém úhlu 67° (fiktivně vycházejícího z koncové části endoskopu).

V případě nutnosti použití záznamové vizualizační techniky je potřeba na motoru provést takové úpravy, které umožní zástavbu požadovaných součástí přesně podle předpisu výrobce. Vzhledem k relativně malým rozměrům dnešních spalovacích motorů a relativně bohatého příslušenství dnešních motorů, je poměrně obtížné nalézt vhodnou přístupovou cestu pro vizualizační techniku tak, aby došlo k požadovanému záznamu.



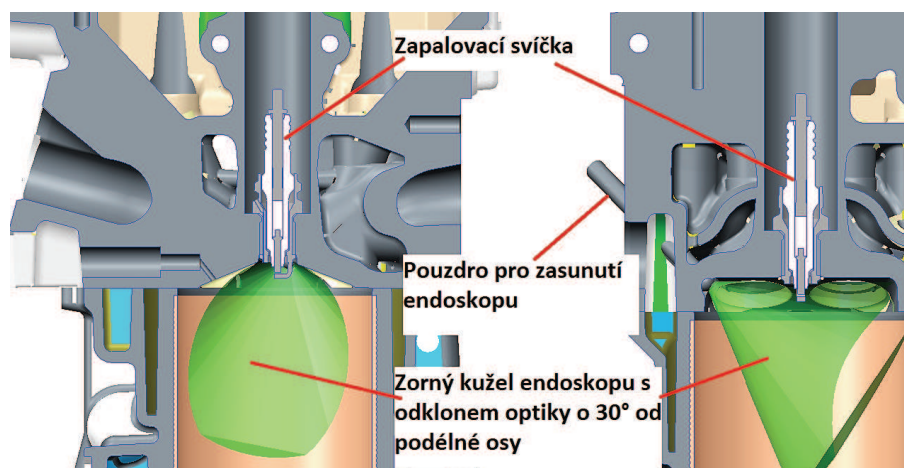
Obrázek 3.4: Základní typy endoskopů používaných pro aplikace na spalovacím motoru. [45]

	PixelFly	DiCamPro
		
Rozlišení [pixel]	640 x 480	1280 x 1024
Dynamický rozsah A/D [bit]	12	12
Počet snímků za sekundu [fps]	50 (plný rozsah)	8 (plný rozsah)
Expoziční doba [s]	$10\mu\text{s} \div 10\text{s}$	$3\text{ns} \div 1000\text{s}$

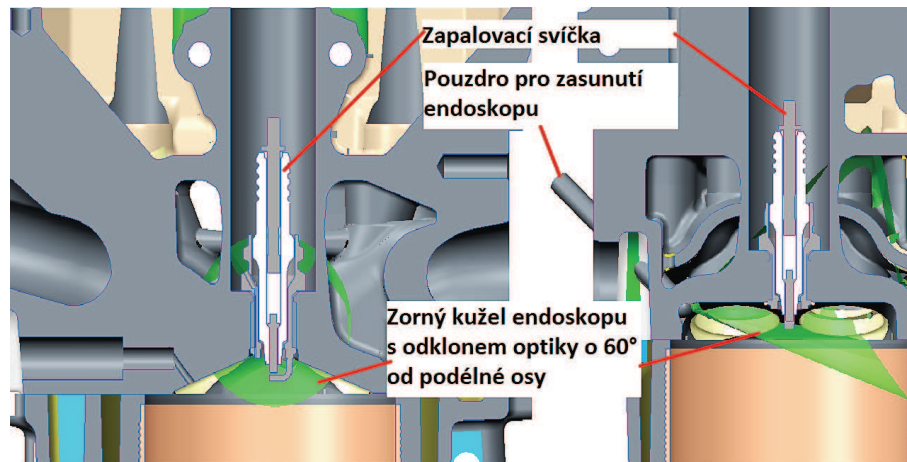
Tabulka 3.2: Vybrané technické parametry (z technické specifikace výrobce kamer PCO) kamer používaných u zařízení AVL Visioscope.

### 3.3.2 Příprava před experimentem

Nezbytnou přípravou provedenou před samotným experimentem je ověření správného umístění endoskopu v hlavě válců na pozorovaný objekt pomocí CAD systému (Creo Parametric) a modelových 3D dat. Zjednodušený pohled na optický přístup do válce motoru, kde je sledovaným objektem zapalovací svíčka, ukazuje obrázek 3.5 a 3.6. Nákresy na obrázku 3.5 zobrazují situaci při použití endoskopu s odklonem optické osy o  $30^\circ$  od svislé osy endoskopu, na obrázku 3.6 pak situaci při použití endoskopu s odklonem  $60^\circ$  od svislé osy endoskopu. Zorný úhel optiky obou endoskopů je shodný -  $67^\circ$  (uvedeno v kapitole 3.3.1).

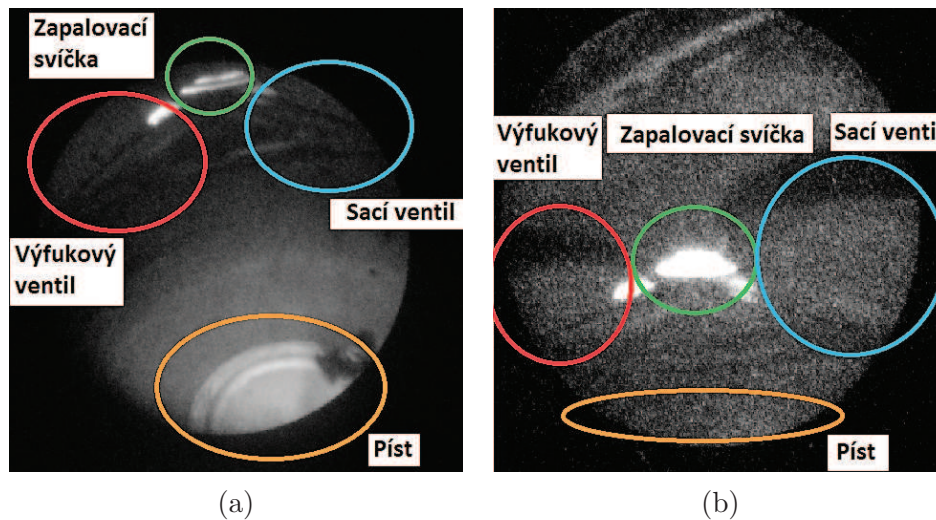


Obrázek 3.5: Nákresy úpravy hlavy válců s vloženým endoskopem (s odklonem optické osy o  $30^\circ$ ) se znázorněním zorného kužele s ohledem na záznam dějů v oblasti zapalovací svíčky. Nákres v levé části obrázku znázorňuje situaci v příčném řezu válce, v pravé části obrázku ukazuje situaci ve válci v podélné ose motoru.



Obrázek 3.6: Nákresy úpravy hlavy válců s vloženým endoskopem (s odklonem optické osy o  $60^\circ$ ) se znázorněním zorného kužele s ohledem na záznam dějů v oblasti zapalovací svíčky. Nákres v levé části obrázku znázorňuje situaci v příčném řezu válce, v pravé části obrázku ukazují situaci ve válci v podélné ose motoru.

Skutečný pohled do válce motoru pomocí chlazeného endoskopu orientovaného na zapalovací svíčku ukazuje obrázek 3.7. Snímky byly pořízeny s osvětlením (pomocí intenzivního bílého světla, jehož zdrojem disponuje vizualizační technika) prostoru válce. Světelný zdroj byl pro záznam snímků (které byly pořízeny při vypnutém motoru) umístěn do prostoru zapalovací svíčky. Odlesky na snímcích níže jsou způsobeny právě použitím intenzivního zdroje světla.



Obrázek 3.7: Optika endoskopu s odklonem  $30^\circ$  na snímku vlevo zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZS (nahore), malou část kompresního prostoru v hlavě válce a prostor válce pod ZS. Snímek vpravo je pro případ endoskopu s odklonem optiky  $60^\circ$ : v zorném kuželu endoskopu je pohled na ZS (ve střední části snímku), větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZS a menší část prostoru válce pod ZS.

### 3.4 Měřicí ústředna MGCplus - HBM

K záznamu ostatních měřených veličin (zejména teplot pomocí termočlánků - viz. kapitola 6.1) byla využívána měřicí ústředna MGCplus, která umožňuje v 8-mi kanálovém provedení záznam s frekvencí až 2400Hz. Záznam je prováděn online a data jsou online zobrazována na monitor řídicího počítače pomocí dodávaného SW vybavení CatmanEasy. Měřicí ústředna MGCplus dále umožňuje:

- snímání:
  - napěťových signálů -10 až +10 V,
  - proudových signálů 4 až 20 mA,
  - frekvenčních signálů,
  - teplot pomocí termočlánků,
  - teplot pomocí odporových snímačů,
- snímače točivého momentu v rozsahu od 5 do 250 Nm.



Obrázek 3.8: Měřicí ústředna MGCplus (od fy HBM) při experimentech používaná zejména k záznamu teplot pomocí termočlánků.

### 3.5 Emisní aparatura

Jednotlivé složky plyných emisí byly měřeny v suchých výfukových plynech pomocí emisní aparatury, která je složena z analyzátorů uvedených v tabulce 3.3 níže. Odběr vzorku výfukových plynů (před katalyzátorem) byl do sestavy emisních analyzátorů veden vyhřívanou hadicí (z důvodu zabránění kondenzace).

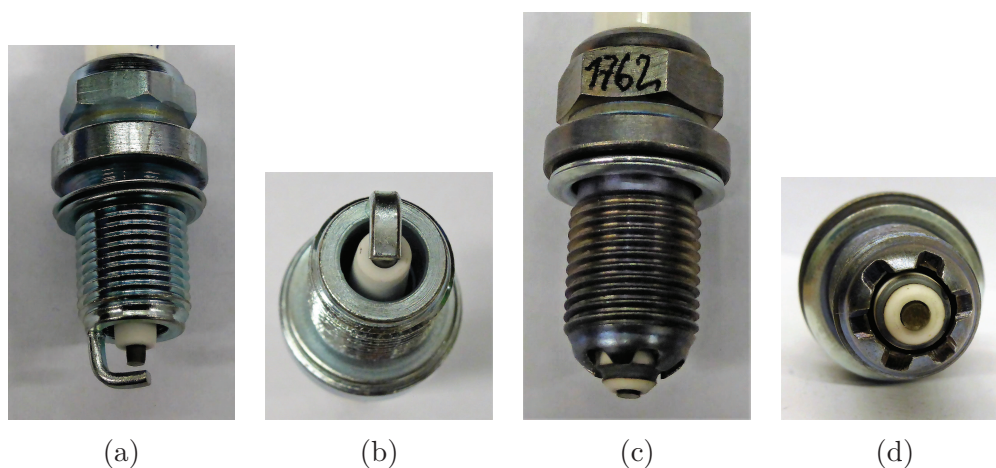
Složka emisí	Typ analyzátoru	Princip měření
CO	URAS 2T	NDIR
NO <sub>x</sub>	HORIBA CLA-150	chemiluminiscenční
HC	AMLUK FID E 2000	plameno-ionizační
CO <sub>2</sub>	URAS 3E	NDIR

Tabulka 3.3: Emisní analyzátorů používané pro experimenty.



## 4 Experimentální výzkum vlivu konstrukčního provedení ZS na vlastnosti zážehového motoru

Vlastnosti motoru byly vyšetřovány se zapalovací svíčkou Brisk A (klasická varianta s jednou elektrodou - elektrodová vzdálenost 1mm) a zapalovací svíčkou Brisk B (varianta ZS s pomocnou elektrodou na špičce izolátoru). Při měření na motoru byl sledován vliv různého konstrukčního provedení ZS na parametry hoření a pracovního oběhu a na provozní, výkonové a emisní parametry zážehového motoru. Následující kapitola popisuje způsob měření, vyhodnocení a zpracování výsledků a výsledky samotné. Použité svíčky jsou zobrazeny na obrázku 4.1 níže.



Obrázek 4.1:

- a) Zapalovací svíčka Brisk A.
- b) Detail spodní partie zapalovací svíčky Brisk A.
- c) Zapalovací svíčka Brisk B.
- d) Detail spodní partie zapalovací svíčky Brisk B.

### 4.1 Program měření

Provozní režimy motoru při měření byly zvoleny tak, aby vlastnosti motoru, které mohou být ovlivněny zapalovacími svíčkami, byly vyšetřeny v celé provozní oblasti vozidlového motoru. Motor byl proto velmi podrobně vyšetřován v režimech:

- vnější otáčkové charakteristiky (VOCH) (celkem 19 režimů v rozsahu  $n = 1500 - 5500$  1/min),
- zatěžovací charakteristiky (ZCH) při  $n = 2000, 3700$  a  $5000$  1/min (celkem 3 x 7 režimů - 6, 15, 30, 50, 65, 80Nm a plná zátěž).

Při měření byly na monitoru ovládacího systému zkušebny sledovány a systémem sběru dat průběžně zaznamenávány hodnoty všech standardních provozních veličin motoru. Celý program měření byl proveden při provozu motoru na benzin BA95. Spotřeba paliva byla ve všech ustálených provozních režimech motoru měřena zařízením AVL 733S.

Ve všech provozních režimech motoru byla prováděna vysokotlaká indikace pomocí měřicí techniky AVL Indicom (viz. kapitola 3.2). Při měření byly na monitoru systému Indicom sledovány on-line průběhy tlaku v jednotlivých válcích a z on-line termodynamické analýzy změřených průběhů tlaku ve válcích a statistického zpracování i hodnoty parametrů pracovních oběhů motoru a parametrů průběhů hoření v jednotlivých válcích (vč. variability sledovaných parametrů). Všechna data z vysokotlaké indikace byla ukládána do archivu AVL Indicom pro pozdější vyhodnocení výsledků měření.

Údaje o seřízení motoru v jednotlivých provozních režimech byly sledovány pomocí lambda-měřiče ETAS (širokopásmová  $\lambda$  sonda) a výpisem dat z řídicí jednotky pomocí diagnostického SW DiagRA-D s připojením diagnostického Interface Basic+AC.

Ve všech provozních režimech motoru byla prováděna analýza výfukových plynů: vzorek výfukových plynů byl odebírán z výfukového potrubí před katalyzátorem a veden vyhřívaným potrubím do sestavy analyzátorů k on-line určení molárních zlomků (objemových koncentrací) výfukových škodlivin a dalších složek ve výfukových plynech.

## 4.2 Způsob vyhodnocení a zpracování výsledků

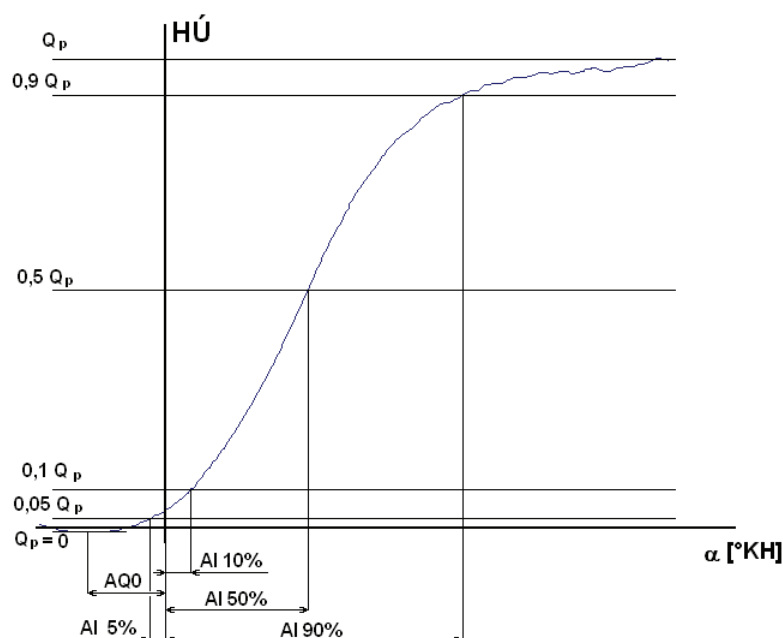
Hodnoty jednotlivých sledovaných provozních a výkonových parametrů byly stanoveny jako průměr ze zaznamenaných dat každého sledovaného parametru v měřicím intervalu 30 – 50s vždy po ustálení provozního režimu motoru (kritériem pro ustálení provozního režimu byla teplota výfukových plynů před katalyzátorem).

Z vysokotlaké indikace motoru a z termodynamické analýzy souborů 100 po sobě následujících změřených průběhů tlaku v ustáleném provozním režimu motoru byly statistickým zpracováním určovány následující střední (průměrné) hodnoty parametrů pracovního oběhu a parametrů průběhu hoření v každém pracovním oběhu ve všech válcích:

- Střední indikovaný tlak  $p_i$  pracovního oběhu motoru.
- Začátek hoření palivovzdušné směsi ve válci, definovaný uvolněním 5% tepla z celkového přívodu tepla do oběhu (Q5%): začátek hoření je určený úhlovou polohou KH ve vztahu k HÚ.

- Konec hlavní fáze hoření palivovzdušné směsi ve válci, definovaný uvolněním 90% tepla z celkového přívodu tepla do oběhu ( $Q_{90\%}$ ): konec hlavní fáze hoření je určen polohou KH za HÚ.
- Vyhoření 10% a 50% palivovzdušné směsi ve válci, definované uvolněním 10% a 50% tepla z celkového přívodu tepla do oběhu, určené úhlovou polohou KH ve vztahu k HÚ.

Pro všechny střední hodnoty výše uvedených parametrů ze souboru 100 pracovních cyklů v každém válci motoru byla ze statistického zpracování souborů pro jednotlivé parametry určena jejich variabilita. Střední hodnoty jednotlivých parametrů a jejich variability jsou pomocí SW Concerto převedeny do tabulek a grafů pro možné další zpracování. Významné body na křivce průběhu vyhořívání pracovní náplně ve válci ukazuje graf na obrázku 4.2 níže. Pro popis počáteční fáze průběhu hoření je důležitým údajem předstih zážehu. Aktuální hodnota předstihu zážehu byla zjišťována výpisem z řídicí jednotky pomocí diagnostického SW DiagRA-D.



Obrázek 4.2: Vyhodnocované údaje na integrálním průběhu uvolňování tepla při hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru. [6]

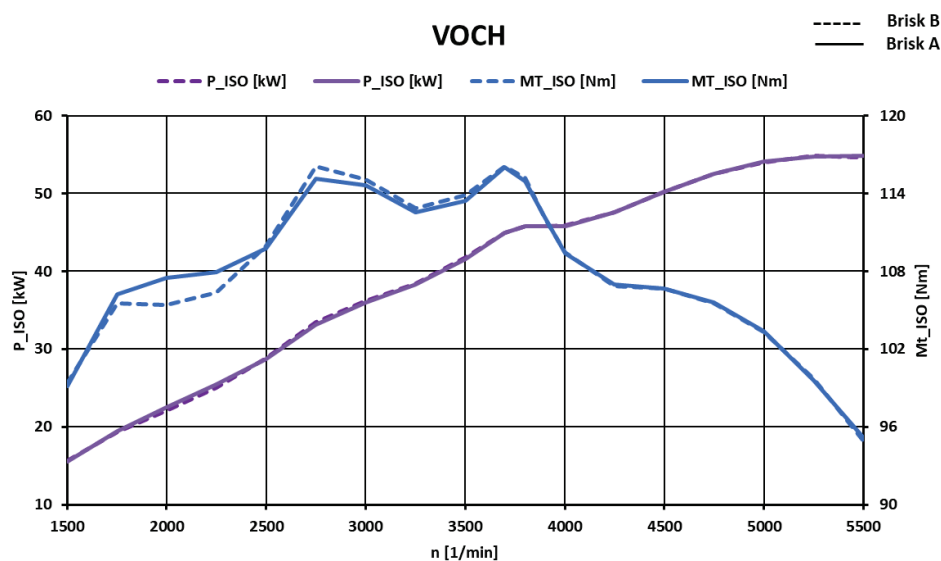
AI 5% poloha KH při vyhoření 5% náplně válce (začátek hlavní fáze hoření),  
 AI 10% poloha KH při vyhoření 10% náplně válce,  
 AI 50% poloha KH při vyhoření 50% náplně válce,  
 AI 90% poloha KH při vyhoření 90% náplně válce (konec hlavní fáze hoření),  
 Q 5%-90% úhel pootočení KH pro hlavní fázi hoření, tj. od 5% do 90% náplně,  
 AQO poloha klikového hřídele vzhledem k HÚ, při které začíná hoření.



## 4.3 Výsledky měření

### 4.3.1 Výkonové a provozní parametry motoru

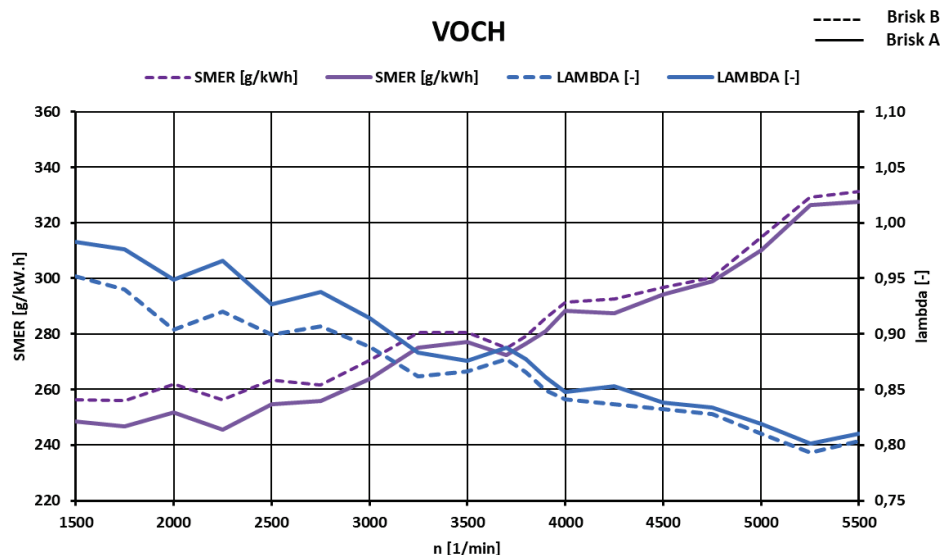
V režimech vnější otáčkové charakteristiky se výkonové a provozní vlastnosti motoru při osazení jednotlivými variantami zapalovacích svíček odlišovaly spíše nevýznamně, jak ukazují grafy na obrázku 4.3.  $P$  [kW] a  $M_t$  [Nm] jsou v grafech uváděny korigované podle normy ISO, měrné spotřeby paliva (v grafech označované SMER) jsou nekorigované.



Obrázek 4.3: Výkonové parametry motoru při VOCH.

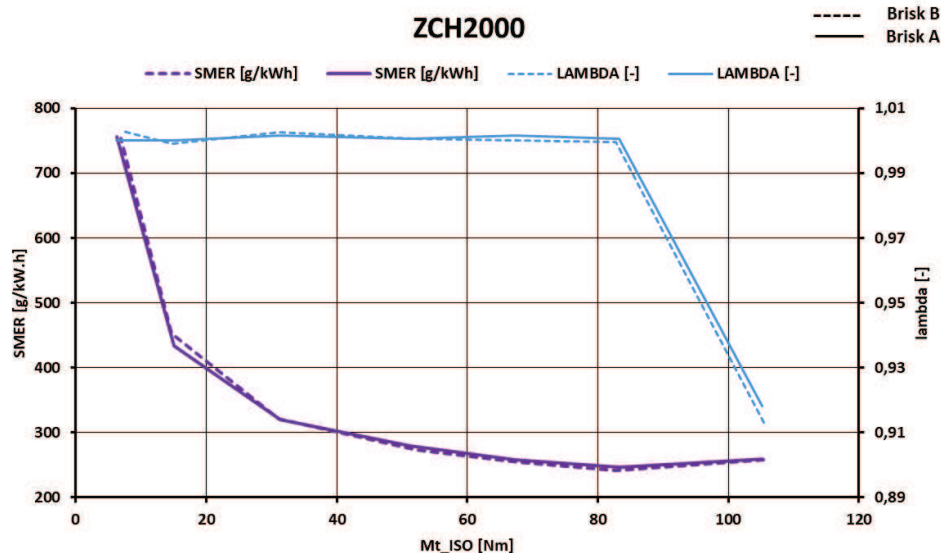
Určité odchylky v průbězích točivých momentů  $M_{t\_ISO}$  a měrných spotřeb paliva SMER v režimech vnější otáčkové charakteristiky (VOCH) mohou být jistě ovlivněny provedením jednotlivých variant měřených zapalovacích svíček. Vliv na výkonové parametry však má i seřízení motoru (bohatost palivovzdušné směsi, předstih zážehu), které se působením řídicí jednotky (EŘJ) může poněkud měnit v průběhu měření (jako odezva na odchylné podmínky při měření, změny v důsledku kvality paliva aj.) a tím jsou ovlivňovány i měřené vlastnosti motoru.

Rozdíly v seřízení bohatosti palivovzdušné směsi v režimech VOCH, které jsou ukázány na obrázku 4.4, vcelku korespondují s průběhy měrných spotřeb paliva (větší obohacení palivovzdušné směsi logicky vede ke zvýšení měrné spotřeby paliva).

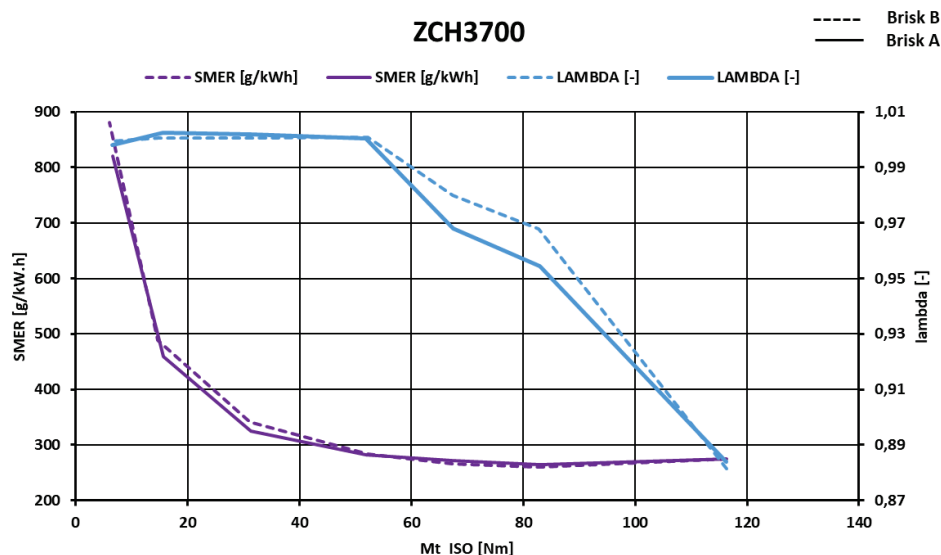


Obrázek 4.4: Provozní parametry motoru při VOCH.

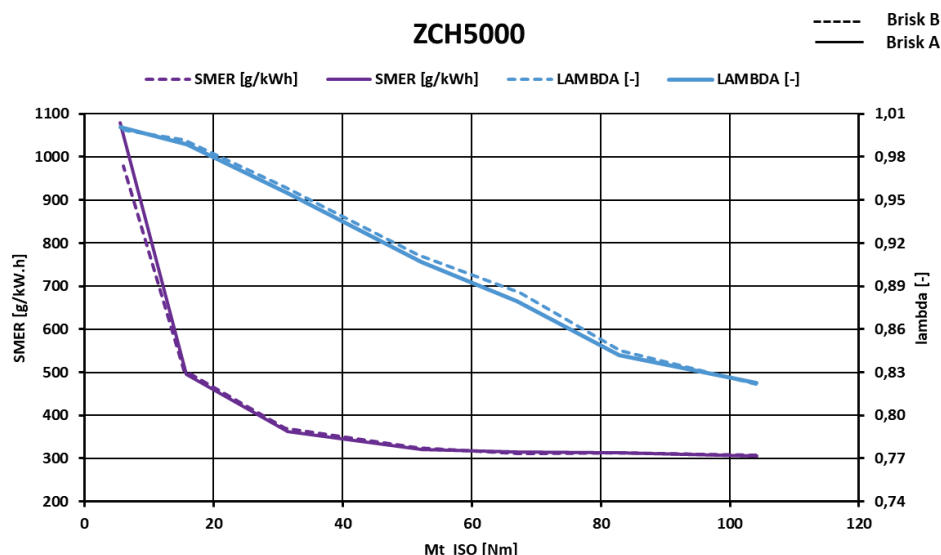
V režimech zatěžovacích charakteristik jsou průběhy měrných spotřeb paliva opět jen málo rozdílné při osazení motoru jednotlivými variantami měřených ZS, jak ukazují grafy na obrázcích 4.5, 4.6 a 4.7. Průběhy současně ukazují velmi dobrou shodu výsledku měření s hodnotami měrných spotřeb paliva, které lze pro měřené otáčkové režimy nalézt v úplné charakteristice motoru EA111.03E, uváděné výrobcem motoru.



Obrázek 4.5: Provozní parametry motoru při ZCH2000.



Obrázek 4.6: Provozní parametry motoru při ZCH3700.



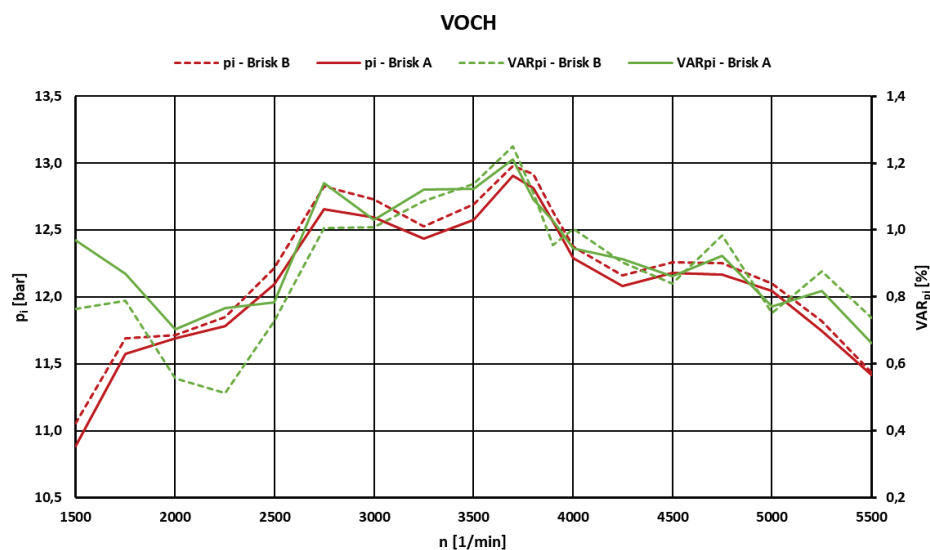
Obrázek 4.7: Provozní parametry motoru při ZCH5000.

Další výsledky jsou uvedeny v příloze A.1.

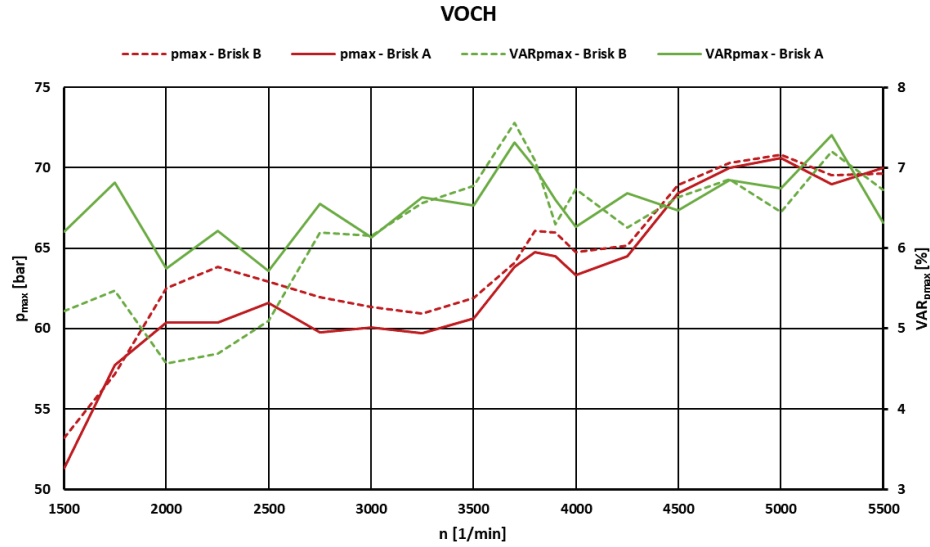
### 4.3.2 Parametry pracovního oběhu a parametry průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru

Grafické vyhodnocení výsledků vyšetřování parametrů pracovního oběhu a parametrů průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru v měřených režimech vnější otáčkové charakteristiky a zatěžovacích charakteristik je v grafech na obrázcích 4.8

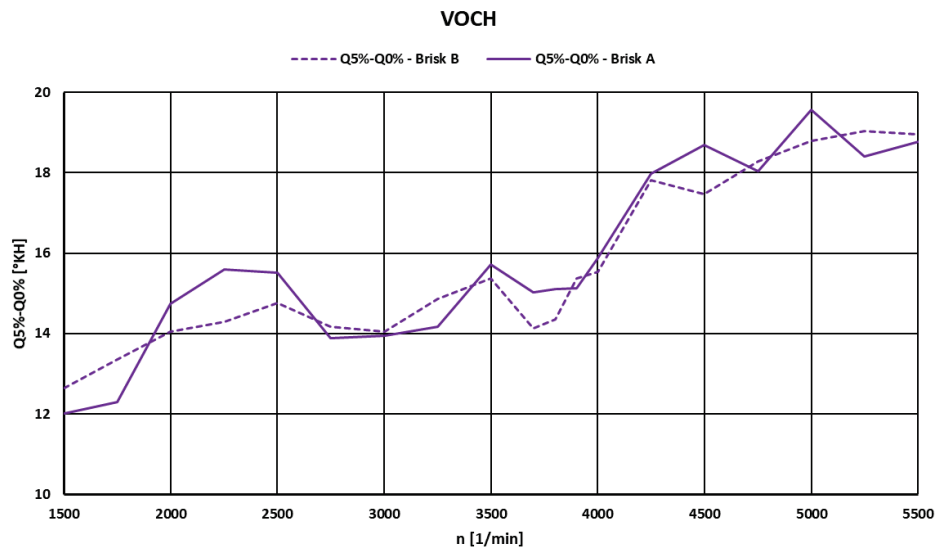
až 4.13. Pozornost je věnována zejména středním hodnotám parametrů pracovního oběhu a jejich variabilitě. Průběhy sledovaných parametrů v těchto grafech ukazují, že mezi jednotlivými variantami měřených zapalovacích svíček nejsou podstatné rozdíly. Lze sice konstatovat určitý rozdíl v hodnotách vyhodnocených středních indikovaných tlaků pracovního oběhu (např. na 4.8 vyšší hodnoty  $p_i$  pro ZS Brisk B - tomu odpovídají i vyšší hodnoty  $p_{max}$  a je to i v souladu s naměřenou vyšší hodnotou točivého momentu na 4.3), pravděpodobně to ale je důsledek mírného obohacení palivovzdušné směsi činností EŘJ (viz 4.4). Výsledky měření a jejich vyhodnocení ukazují, že obě varianty ZS vykazují velmi kvalitní vlastnosti z hlediska variability středních indikovaných tlaků i maximálních tlaků pracovního oběhu.



Obrázek 4.8: Parametry pracovního oběhu při VOCH - střední indikovaný tlak  $p_i$  a jeho variabilita  $VAR_{p_i}$ .



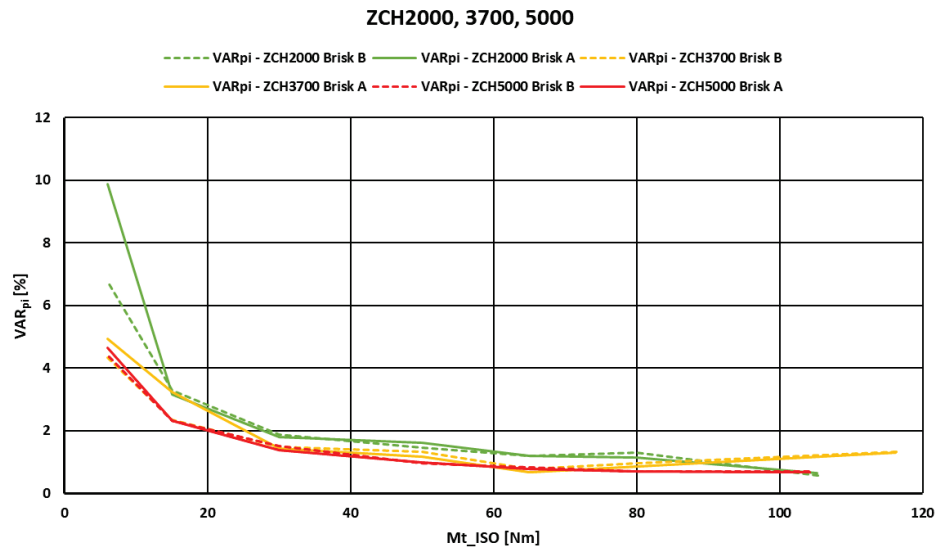
Obrázek 4.9: Parametry pracovního oběhu při VOCH - maximální tlak  $p_{max}$  a jeho variabilita  $VAR_{p_{max}}$ .



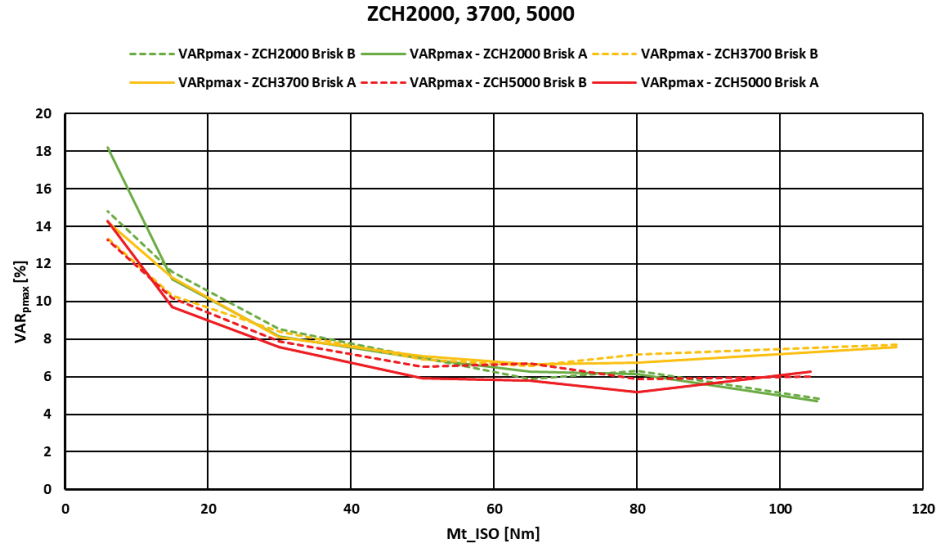
Obrázek 4.10: Trvání počáteční fáze hoření ( $Q_{5\%}-Q_{0\%}$ ) při VOCH.

V režimech VOCH vykazuje ZS s označením B průměry středních indikovaných tlaků v souboru 100 cyklů pracovního oběhu motoru v celém rozsahu otáček mírně vyšší hodnoty. Shodně tomu je i u průběhů průměrných hodnot maximálních tlaků v celém otáčkovém rozsahu. Tento poznatek lze vysvětlit mírně rychlejším průběhem vyhořívání náplně válce zejména v počáteční fázi ( $Q_{5\%}-Q_{0\%}$ ) se ZS typu B - znázorněno na obrázku 4.10. Z tohoto pohledu vychází ZS Brisk B proti ZS Brisk A příznivěji.

Hodnoty  $VAR_{pi}$  cca 1% (na obrázku 4.8) a  $VAR_{pmax}$  cca 7% (na obrázku 4.9) v režimech VOCH u obou variant měřených ZS lze považovat za příznivý výsledek. Průběhy  $VAR_{pi}$  a  $VAR_{pmax}$  mají (logicky) podobný charakter a jsou ovlivněny i seřizováním motoru (předstih zážehu, bohatost palivovzdušné směsi), které je v režimech VOCH optimalizováno z hlediska maximálních tlaků ve válci  $p_{max}$  (v oblasti nízkých otáček motoru je silové zatížení klikového mechanismu od tlaku ve válci pouze málo snižováno účinkem setrvačných sil, proto se více snižuje předstih zážehu k omezení  $p_{max}$ ).

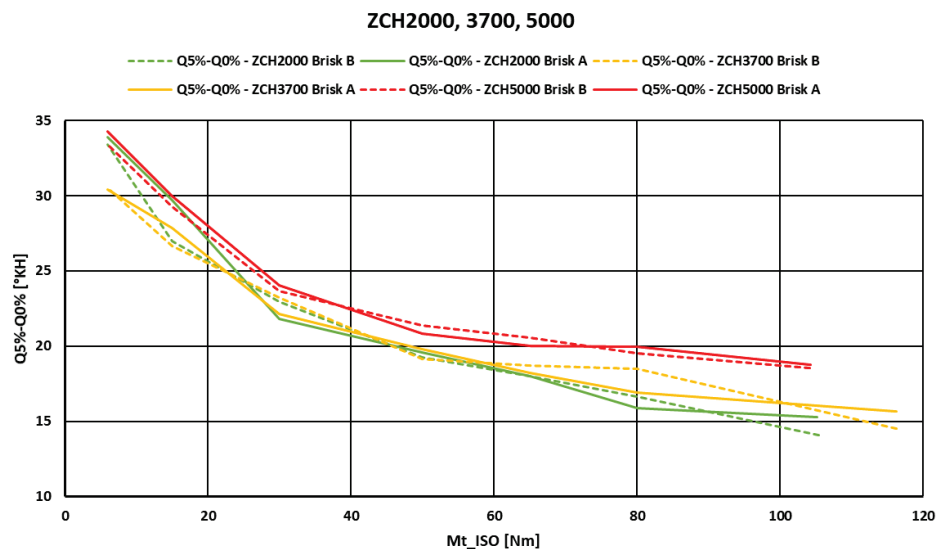


Obrázek 4.11: Parametry pracovního oběhu při ZCH - variabilita  $VAR_{pi}$  středního indikovaného tlaku  $p_i$ .



Obrázek 4.12: Parametry pracovního oběhu při ZCH - variabilita  $VAR_{p_{max}}$  středního indikovaného tlaku  $p_{max}$ .

Variabilita parametrů pracovního oběhu motoru v režimech zatěžovacích charakteristik na obrázcích 4.11 a 4.12 vykazuje u obou měřených variant ZS obvyklou závislost na zatížení motoru. S poklesem zatížení motoru se variability  $VAR_{p_i}$  a  $VAR_{p_{max}}$  zvyšují: je to důsledek zvyšování podílu zbytkových plynů v čerstvé náplni válce při kvantitativní regulaci zážehového motoru.



Obrázek 4.13: Trvání počáteční fáze hoření ( $Q_{5\%}-Q_{0\%}$ ) při ZCH.

Poznatky z dřívějšího výzkumu (probíhajícího na KVM TUL) na zážehových motorech ukázaly, že variabilita parametrů pracovního oběhu motoru ( $VAR_{p_i}$  i  $VAR_{p_{max}}$ ) souvisí s průtahem zážehu a rychlostí rozběhu počáteční fáze hoření:



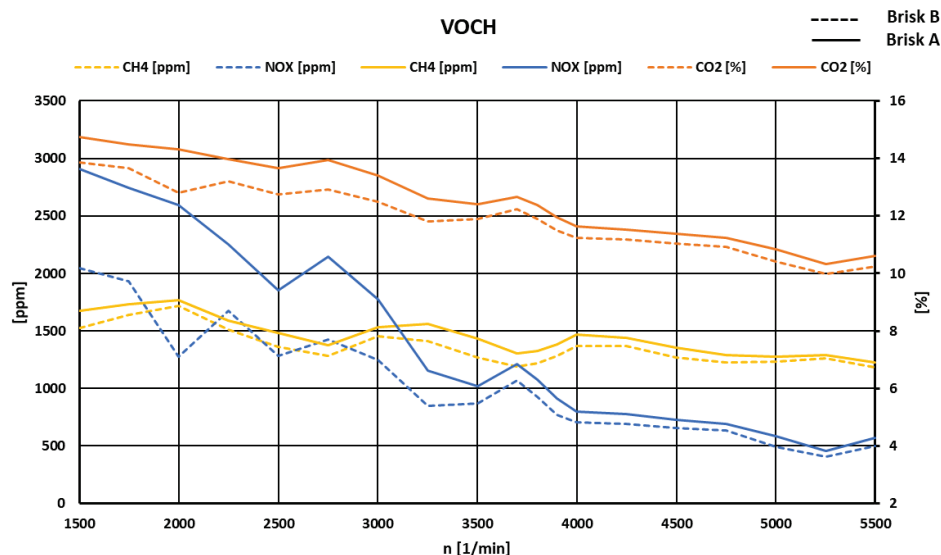
kratší průtah zážehu a vyšší rychlost počátečního hoření vedou ke snížení hodnot variability obou nejvýznamnějších parametrů pracovního oběhu motoru. Vzhledem k obtížnému stanovení průtahu zážehu i počáteční rychlosti hoření ve válci zážehového motoru se pro popis počáteční fáze hoření používá vyjádření úseku pootočení klikového hřídele od zážehu do uvolnění 5% tepla z celkového množství tepla (energie) v náplni válce. Z vyhodnocení středních hodnot souřadnic 5% bodů vyhořívání náplně v jednotlivých válcích a dalším zprůměrováním jsou v grafu na obrázku 4.13 zakresleny závislosti úhlu pootočení klikového hřídele od zážehu do uvolnění 5% tepla pro různé provozní režimy motoru při osazení jednotlivými variantami zapalovacích svíček. Zakreslené průběhy ukazují na malé rozdíly mezi jednotlivými variantami ZS. V těchto případech vykazuje varianta B většinou kratší trvání počáteční fáze vyhořívání náplně válce. Příznivě zde může působit provedení jiskřiště, které proti klasickému jednobodovému zážehu zřejmě rozšiřuje oblast zážehu na větší objem palivovzdušné směsi kolem centrální elektrody.

Další výsledky jsou uvedeny v příloze A.1.

### 4.3.3 Emisní vlastnosti motoru

Při všech měřeních motoru se ZS Brisk A a Brisk B byly zjišťovány výfukové emise (s odběrem vzorku výfukových plynů před katalyzátorem). V grafu na obrázku 4.14 je uveden výsledek měření v režimech VOCH. Měřené koncentrace se pohybují v obvyklých hodnotách (výrazný pokles hodnoty  $\text{NO}_x$  je způsoben vyšší bohatostí palivovzdušné směsi - viz. 4.4). Podobně jako v případech výkonových a provozních parametrů motoru a parametrů pracovního oběhu je výsledek emisních měření ovlivněn aktuálním seřízením motoru (předstihu, bohatosti palivovzdušné směsi) v každém měřeném režimu působením EŘJ motoru.

Emisní měření doplňují měření výkonových a provozních parametrů motoru, měření průběhů tlaků ve válcích motoru a výsledek měření vybraných složek výfukových plynů ukazuje, že jednotlivé varianty zapalovacích svíček mají velice podobný účinek i na emisní vlastnosti motoru.



Obrázek 4.14: Průběh koncentrací produkovaných emisních složek při VOCH.

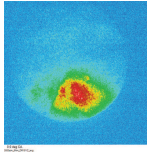
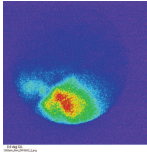
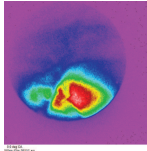
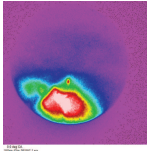
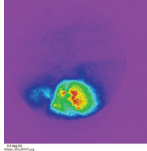
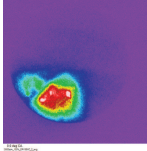
Další výsledky jsou uvedeny v příloze A.1.

#### 4.3.4 Snímky rozvoje hoření pro zapalovací svíčky BRISK A a B

Pro porovnání zapalovacích svíček byla provedena vizualizace hoření od zážehu až do pokročilého rozvoje hoření. Vizualizace byla provedena v režimech středních otáček motoru při velmi nízkém (6Nm), středním (67Nm) a plném zatížení. Po posouzení vhodnosti zobrazení sledovaných dějů ve válci endoskopy s odklonem optiky jak 30° tak 60° byla pro zobrazení výsledků zvolena varianta endoskopu s odklonem 60°.

Pořízené snímky ukazují situaci ve válci od zážehu až do HÚ s postupem po 2 stupních polohy klikového hřídele (tj. s časovým krokem  $\Delta\tau = 0,11\text{ms}$ ). Snímky jsou výsledkem statistického zpracování 10 zaznamenaných „obrazů“ ve válci v každé jednotlivé poloze klikového hřídele. Kompletní zobrazení je z důvodu značné obsáhlosti uvedeno v příloze A.3.

V následující tabulce jsou uvedeny pouze snímky stavu rozvoje hoření v HÚ, tj. prakticky na počátku hlavní fáze hoření.

	Brisk A	Brisk B
velmi nízké zatížení		
střední zatížení		
vysoké zatížení		

Tabulka 4.1: Snímky stavu rozvoje hoření v HÚ pro ZS BRISK A a ZS BRISK B.

## 5 Experimentální výzkum a vývoj ZSIK

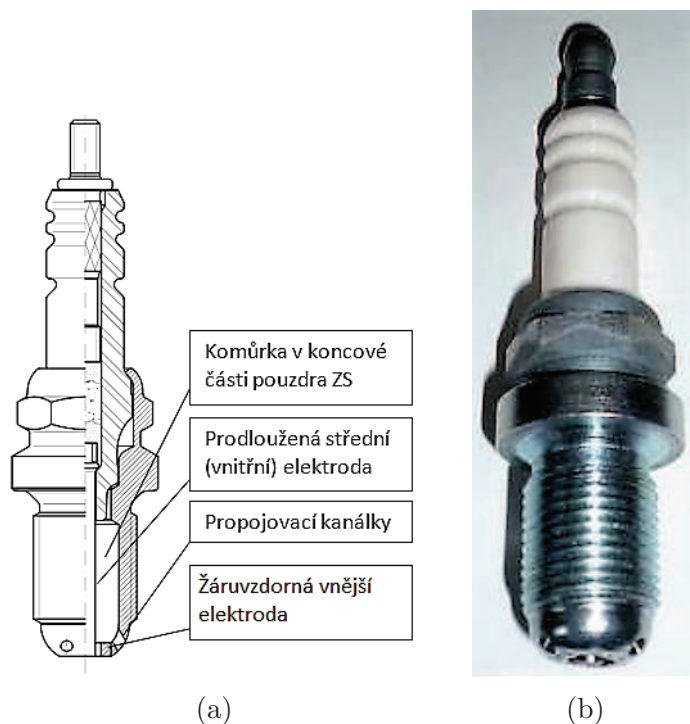
Následující kapitola se zabývá hodnocením vlivu způsobu zážehu palivovzdušné směsi zapalovací svíčkou s integrovanou komůrkou bez samostatného přívodu paliva - tzv. pasivní komůrkový zážeh (viz. kapitola 2.4). Na základě informací získaných z měření jednotlivých variant ZSIK na motoru jsou poté navržena různá konstrukční provedení ZSIK. Pro jednotlivá provedení ZSIK jsou provedena měření na motoru s hodnocením parametrů hoření a pracovního oběhu a dále pak provozní, výkonové a emisní parametry zážehového motoru se ZSIK. Kapitola rovněž zmiňuje problémy spojené se ZSIK. ZSIK byly vyrobeny s pomocí výrobce zapalovacích svíček Brisk Tábor, a.s.

Konstrukce ZSIK zajišťuje současný zážeh připravené homogenní palivovzdušné směsi ve válci a zážeh malého množství palivovzdušné směsi v chráněném objemu (zapalovací komůrce) ve spodní části pouzdra zapalovací svíčky. Vysokonapětovým výbojem na elektrodách zapalovací svíčky ve spodní části pouzdra (střední elektrodě prodloužené do centrálního otvoru dna komůrky) se velmi rychle vytvoří koncentrace aktivovaných částic v komůrce pouzdra zapalovací svíčky (objem v zapalovací komůrce je chráněn od turbulencí ve válci motoru), potřebná pro vznik a následný rychlý rozvoj hoření v malém objemu zapalovací komůrky. Rychlý rozvoj hoření palivovzdušné směsi v objemu komůrky vytvoří přetlak, kterým hořící palivovzdušná směs z komůrky vyšlehne přes propojovací otvory do spalovacího prostoru ve válci motoru. Ve válci vzniknou na více místech nová ohniska hoření s následným urychlením rozvoje hoření palivovzdušné směsi ve válci. Tím se urychlí rozvoj počáteční fáze hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru a sníží se variabilita pracovních oběhů.

### 5.1 ZSIK s vnitřním objemem $0,95\text{cm}^3$

Tato část práce byla publikována v [A.7, A.8].

Po dřívějších zkušenostech z výzkumu a vývoje několika variant ZSIK na KVM TUL byly navrženy varianty ZSIK s vnitřním objemem v komůrce  $0,95\text{ cm}^3$  (obrázek 5.1a). Pouzdra ZSIK byla zhotovena podle dokumentace KVM z materiálu ČSN 11 110 ve firmě BRISK a.s. Vnější elektroda v centrálním otvoru dna byla vytvořena navařením kroužku ze stejného (žárovzdorného) materiálu, ze kterého je zhotovena vnější elektroda u klasické zapalovací svíčky (svar laserem).



Obrázek 5.1:

- a) Provedení ZSIK s vnitřním objemem  $0,95\text{cm}^3$ .
- b) Vyrobené funkční vzorky ZSIK.

V laboratořích TUL a s pomocí BRISK bylo vyrobeno 40 ks pouzder ZSIK s navařeným kroužkem. Povrchová dokončovací úprava byla poté dokončena v BRIS-Ku. Ve 2 pouzdrech byly vyvrtány otvory o průměru 0,45mm pro měření teplot v nejspodnější partii pouzdra ZSIK (viz. kapitola 6.1). Bylo vyrobeno po 4 ks variant v provedení A, B a C. Po změření byla varianta A upravena na variantu D (sražením hrany  $0,5 \times 45^\circ$  na centrálním otvoru  $\varnothing 4,4\text{mm}$ ). Vnější průměr prodloužené střední elektrody byl 2,7mm. Rozdíly mezi jednotlivými variantami ZSIK jsou v konfiguraci střední elektrody a centrálního otvoru dna pouzdra zapalovací svíčky - uvedeno v tabulce 5.1 níže.

varianta	detail spodní partie	poznámka
A		ZSIK - A; 3 výšlekové otvory
B		ZSIK - B; 3 výšlekové otvory
C		ZSIK - C; bez výšlekových otvorů
D		ZSIK - D; 3 výšlekové otvory

Tabulka 5.1: Provedení jednotlivých variant ZSIK s objemem vnitřní komůrky 0,95cm<sup>3</sup>.

### 5.1.1 Program měření

Provozní režimy motoru při měření byly zvoleny shodně s měřením klasických zapalovacích svíček. Motor byl proto velmi podrobně vyšetřován v režimech:

- vnější otáčkové charakteristiky (celkem 19 režimů v rozsahu  $n = 1500 - 5500$  1/min),
- zatěžovací charakteristiky při  $n = 2000, 3700$  a  $5000$  1/min (celkem 3 x 7 režimů - 6, 15, 30, 50, 65, 80 Nm a plná zátěž).

Při měřeních byly na monitoru ovládacího systému zkušebny sledovány a systémem sběru dat průběžně zaznamenávány hodnoty standardních provozních veličin motoru. Ve všech provozních režimech motoru byla prováděna vysokotlaká indikace pomocí měřicí techniky AVL Indicom (snímače v každém válci motoru) viz. kapitola 3.2. Na motoru byla při měřeních se ZSIK prováděna stejná měření s klasickými zapalovacími svíčkami (ZS od výrobce Bosch s jednou elektrodou - jejíž parametry

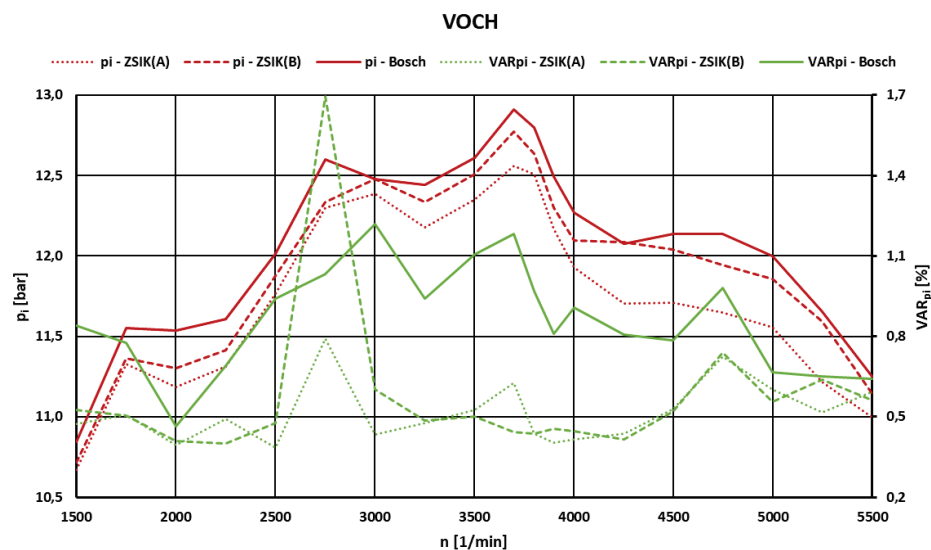
byly prošetřovány stejným způsobem jako ZS Brisk v kapitole 4 - odpovídá svými vlastnostmi ZS Brisk A uváděné v kapitolách výše). Při všech měřeních pracoval zážehový motor se standardní EŘJ, která je optimalizována pro klasické zapalovací svíčky.

Výsledky měření na vozidlovém benzinovém motoru a provedená termodynamická analýza z vysokotlaké indikace jednoznačně prokazují pozitivní efekt zážehu palivovzdušné směsi pomocí ZSIK (efekt „vícebodového“ zážehu). Významné zlepšení parametrů pracovního oběhu motoru i parametrů hoření je prokazatelné ve většině provozních režimů motoru. V provozních režimech s velmi nízkým zatížením se parametry pracovního oběhu motoru i parametrů hoření ale mírně zhoršily (motor má přitom pravidelný chod). Vlastnosti motoru se ZSIK dokumentují zpracované výsledky měření.

### 5.1.2 Výsledky měření

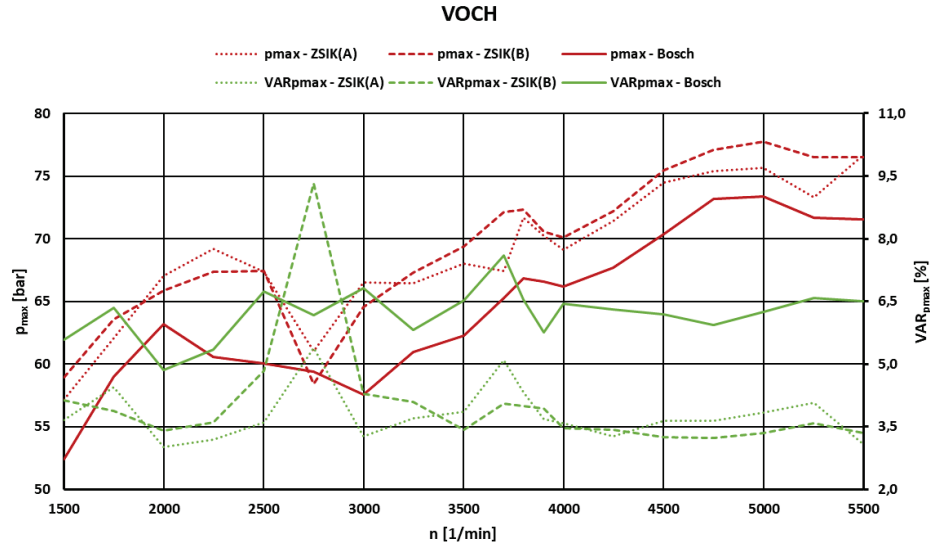
#### Parametry pracovního oběhu a parametry průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru

Výsledky porovnávacích měření na motoru se zážehem palivovzdušné směsi pomocí ZSIK a klasickou ZS na parametry pracovního oběhu motoru v režimech VOCH ukazují grafy na obrázcích 5.2 a 5.3. Uváděné střední hodnoty všech parametrů jsou určeny ze souboru 100 pracovních cyklů všech válců.



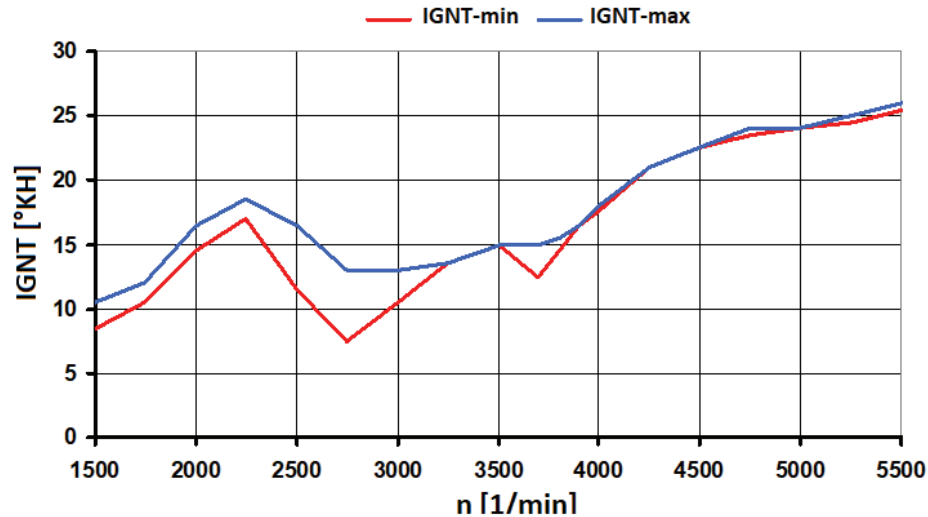
Obrázek 5.2: Příznivý účinek ZSIK na zakreslené parametry je od středních otáček zřejmý.





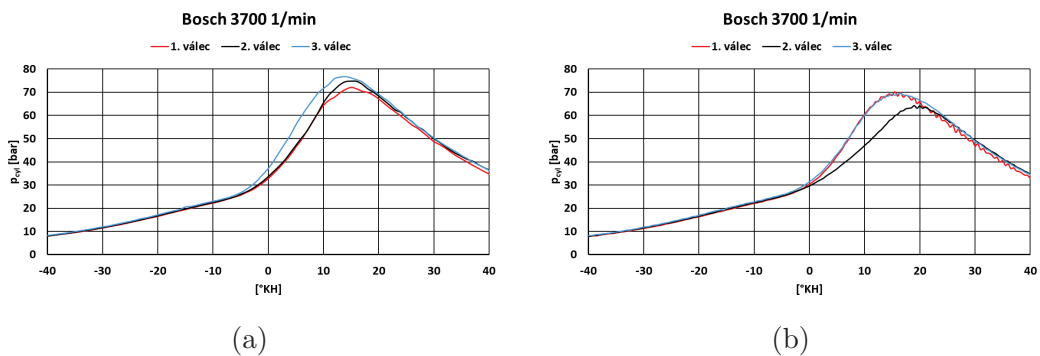
Obrázek 5.3: Parametry pracovního oběhu zkušební motoru při provozu s klasickou zapalovací svíčkou (Bosch) a 2 variantami ZSIK v režimech VOCH.

Výrazné zvýšení variability  $p_i$  a  $p_{max}$  v oblasti středních otáček motoru (viz obrázky 5.2 a 5.3) je zřejmě důsledek regulačního zásahu EŘJ na signál senzoru klepání, kterým se krátkodobě sníží předstih zážehu. Indikační záznam v režimech se sníženým předstihem zážehu je potom rovněž ovlivněn nahodilostí. Výsledkem těchto nahodilostí jsou zdánlivé nelogičnosti v průběhu vyhodnocovaných veličin. Změny předstihu zážehu při provozu motoru se ZSIK(B) v jednotlivých ustálených otáčkových režimech ukazuje obrázek 5.4.



Obrázek 5.4: Proměnlivost předstihu zážehu činností EŘJ při měření VOCH motoru se ZSIK(B). Graf ukazuje, že náchylnost k výskytu klepání v průběhu spalování palivovzdušné směsi ve válci motoru je logicky v režimech nízkých a středních otáček motoru.

Změny v předstihu zážehu, ale i možné změny v bohatosti (resp. obohacení) palivovzdušné směsi při měření v režimech VOCH, se musí nutně projevit změnami ve výsledcích analýzy pracovního oběhu. Statistickým zpracováním dat z početnějšího souboru vyhodnocených indikátorových diagramů se získají kvalitní údaje o změřeném souboru dat. Mezicyklová variabilita však není pouze výsledkem komplikovanosti fyzikálních a chemických dějů ve válci motoru, nepochybně je ovlivněna i činností EŘJ v průběhu vysokotlaké indikace. Dokumentují to grafy na obrázcích 5.5 a 5.6, na kterých jsou průběhy tlaku ve válcích motoru v pracovním oběhu bez klepání a pracovním oběhu s klepáním (jak pro motor s klasickou ZS, tak motor se ZSIK). Z průběhů tlaku lze odhadnout i změny předstihu zážehu v měření souboru 100 po sobě následujících cyklů.

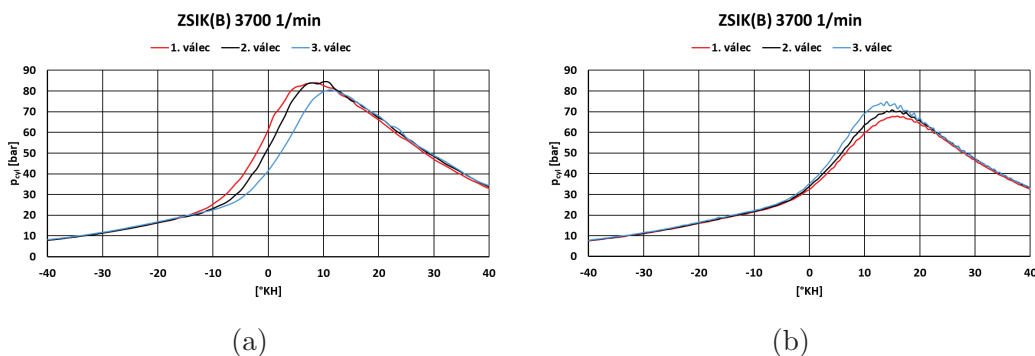


Obrázek 5.5: Průběhy tlaku v jednotlivých válcích motoru s klasickou zapalovací svíčkou v ustáleném režimu středních otáček při VOCH.

Na obrázku 5.5 jsou zobrazeny průběhy tlaku v jednotlivých válcích motoru s klasickou zapalovací svíčkou v ustáleném režimu středních otáček VOCH ve dvou vybraných cyklech motoru ze souboru 100 po sobě následujících cyklů. V celém souboru je střední hodnota maximálního tlaku ve válci  $p_{max} = 63,5$  bar s variabilitou  $VAR_{p_{max}} = 7,1\%$ , střední hodnota předstihu je  $14,9^\circ$  před HÚ.

a) Průběhy tlaku v cyklu s nejvyšší hodnotou  $p_{max}$  v celém souboru 100 cyklů: v 1. a 2. válci jsou průběhy tlaků bez jakéhokoli náznaku klepání, ve 3. válci je velmi slabý náznak klepání.

b) Průběhy tlaku v cyklu, ve kterém v 1. a 2. válci je slabé klepání a ve 3. válci s nejvyšším tlakem je průběh hoření bez jakéhokoli náznaku klepání. Maximální tlaky ve válcích v tomto cyklu jsou menší než v cyklu na a).

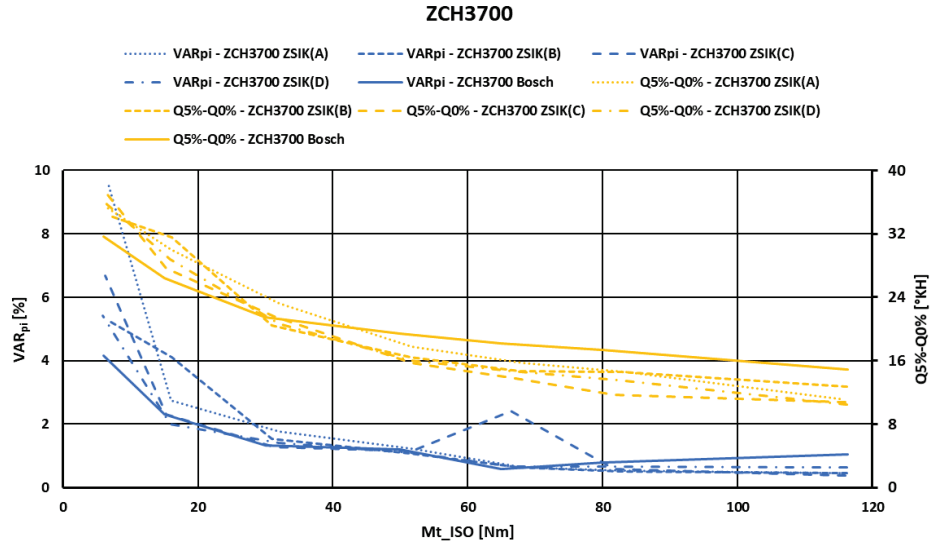


Obrázek 5.6: Průběhy tlaku v jednotlivých válcích motoru se ZSIK(B) v ustáleném režimu středních otáček VOCH.

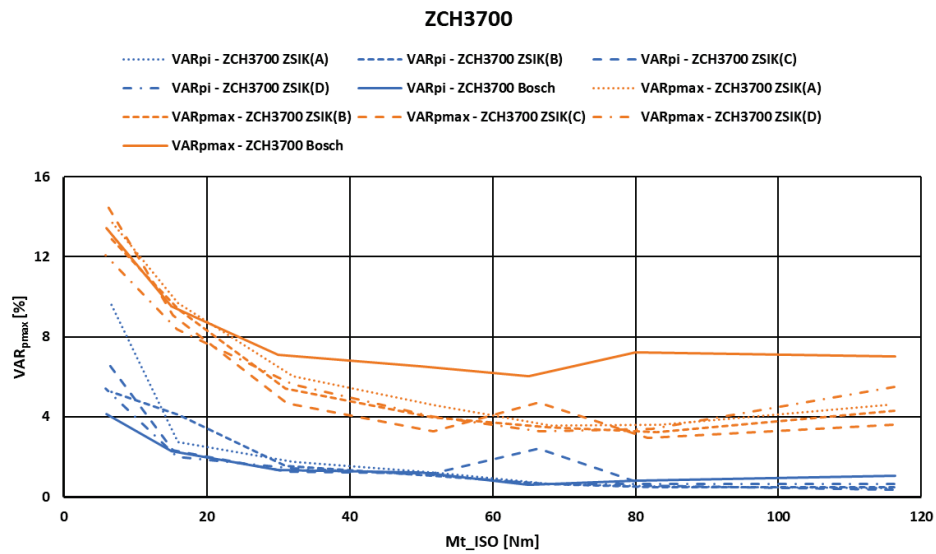
Na obrázku 5.6 jsou zobrazeny průběhy tlaku v jednotlivých válcích motoru se ZSIK(B) v ustáleném režimu středních otáček VOCH ve dvou vybraných cyklech motoru ze souboru 100 po sobě následujících cyklů. V celém souboru je střední hodnota maximálního tlaku ve válci  $p_{max} = 72,1$  bar s variabilitou  $VAR_{p_{max}} = 4,0\%$ , střední hodnota předstihu je  $13,4^\circ$  před HÚ.

a) Průběhy tlaků v cyklu s nejvyšší hodnotou  $p_{max}$  v celém souboru 100 cyklů: v 1. a 2. válci jsou průběhy tlaků s velmi slabým náznakem klepání, ve 3. válci je průběh hoření palivovzdušné směsi bez jakéhokoliv náznaku klepání.

b) Průběhy tlaků v cyklu, ve kterém jsou ve všech válcích velmi slabé náznaky klepání. Maximální tlaky ve válcích v tomto cyklu jsou významně menší než v cyklu na levé straně obrázku.



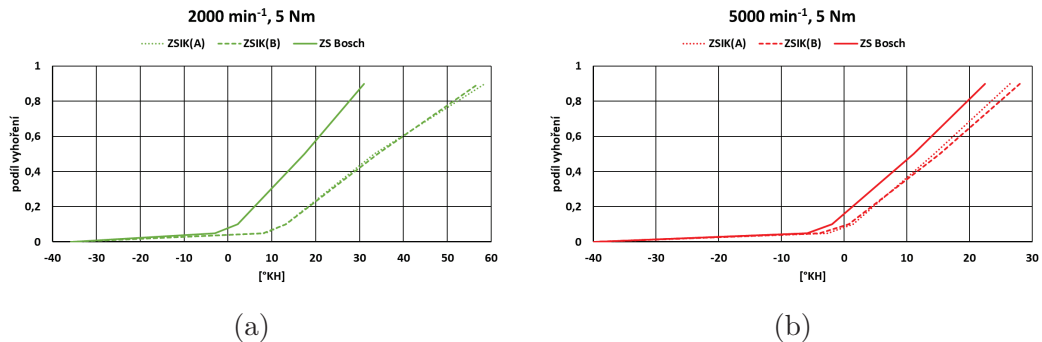
Obrázek 5.7: Z vyhodnocení parametrů hoření a parametrů pracovního oběhu motoru v režimech zatěžovací charakteristiky je zřejmá jasná souvislost délky fáze rozvoje počátečního hoření (0-5)% a variability  $p_i$ .



Obrázek 5.8: V režimech ZCH ve středních otáčkách motoru vykazuje ZSIK od cca 10% zatížení nižší hodnoty variability  $p_i$  než klasická ZS ( $VAR_{pmax}$  je v celém rozsahu zatížení významně nižší).



zážehu již od asi 5% zatížení (při vysokých otáčkách se zřejmě projevuje příznivý vliv vysoké turbulence ve válci).



Obrázek 5.11: Rychlosti hoření v nejnižších otáčkách a a nejvyšších otáčkách motoru při velmi nízkém zatížení.

Další výsledky jsou uvedeny v příloze A.2.

### 5.1.3 Optimalizační program na ZSIK

Ve většině dřívějších srovnávacích měření pracoval motor EA111.03E se sériovou EŘJ motoru bez možnosti změny předstihu zážehu. Z výsledků těchto měření bylo zřejmé, že při provozu se ZSIK dochází k urychlení procesu hoření: situace si proto vyžádala užití "otevřeného" EŘJ s možností on-line úpravy předstihu zážehu (krátkodobě zapůjčeno ze Škoda auto a.s.).

Předstih zážehu při provozu motoru s touto novou EŘJ byl upravován tak, aby se poloha 50% vyhoření náplně válce pohybovala v hodnotách  $5 \div 10^\circ\text{KH}$  za HÚ. Při velmi nízkých zatíženích motoru (při  $p_i < 1$  bar) však nebylo možné tohoto kritéria dosáhnout, neboť se při velkých předstizích zážehu začaly objevovat nezápaly.

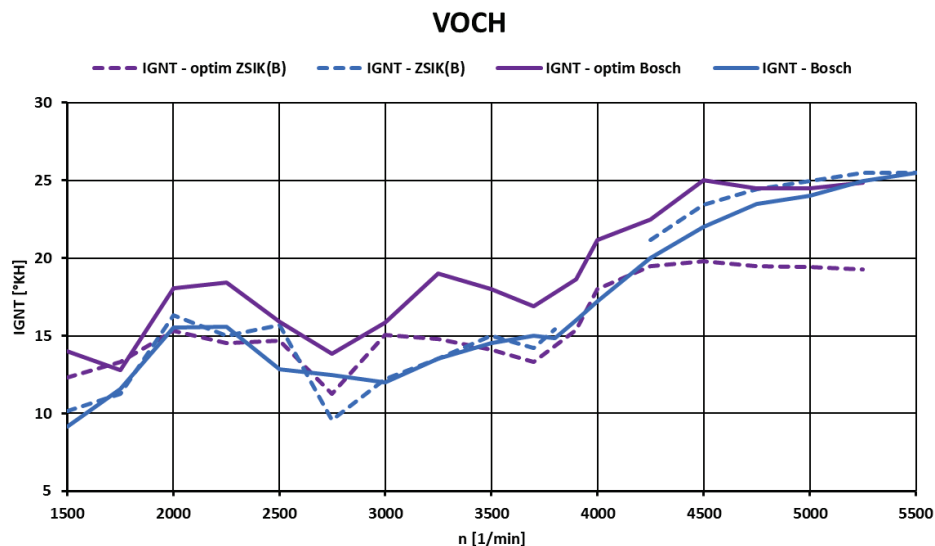
Měření na zkušebním motoru bylo provedeno s cílem porovnat parametry průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru a vlastnosti motoru při provozu s klasickou ZS Bosch a ZSIK(B) v režimech VOCH a ZCH s optimalizovaným předstihem zážehu. Při měřeních byly průběžně zaznamenávány hodnoty standardních provozních veličin motoru. Ve všech provozních režimech motoru byla prováděna vysokotlaká indikace pomocí měřicí techniky AVL Indicom. Z on-line termodynamické analýzy změřených průběhů tlaku ve všech válcích motoru byly vyhodnocovány parametry pracovního oběhu motoru, parametry průběhů hoření v jednotlivých válcích motoru a bylo provedeno statistické zpracování výsledků.

#### Parametry průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru

Z termodynamické analýzy změřených indikátorových diagramů byly statistickým vyhodnocením určeny charakteristické body postupu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru.

Za počátek průběhu hoření je (zjednodušeně) považována střední hodnota předstihu zážehu (stanovena jako aritmetický průměr z dat, zaznamenávaných s krokem

1s v intervalu cca 150 s provozu motoru v ustáleném režimu). Vzhledem k rychlejšímú rozběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci při zážehu pomocí ZSIK jsou hodnoty předstihu zážehu pro ZSIK většinou nižší než pro klasickou ZS. Střední hodnoty předstihu zážehu pro režimy VOCH ukazuje obrázek 5.12.

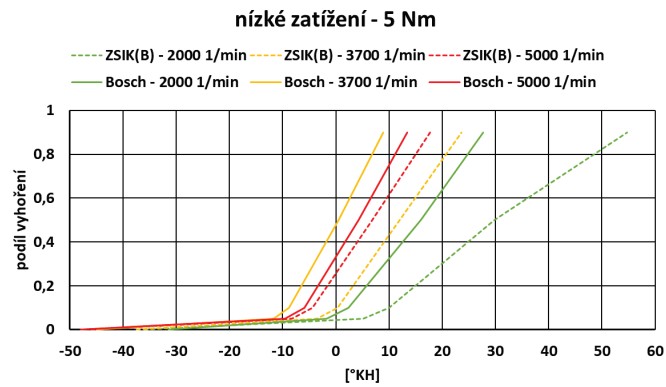


Obrázek 5.12: Průběhy předstihů zážehu (střední hodnoty) při měřeních s „otevřenou“ EŘJ. Pro srovnání je zakreslen i průběh zážehu při dřívějších měřeních se sériovou EŘJ.

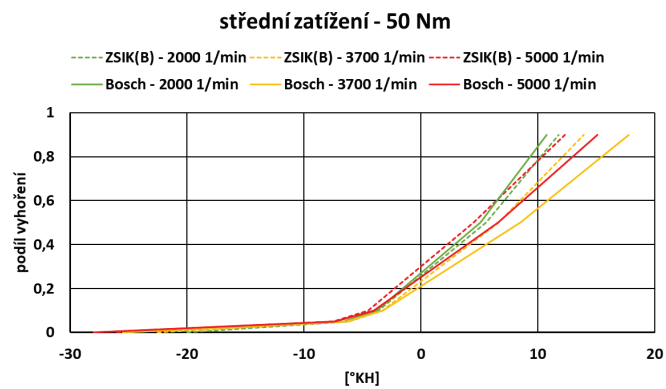
Postup hoření palivovzdušné směsi v 1. válci motoru s klasickou ZS Bosch a ZSIK(B) ukazují grafy na obrázcích 5.13, 5.14 a 5.15. Je zřejmé (a v souladu s dřívějšími výsledky měření se sériovou EŘJ), že v režimech velmi nízkých zatížení vykazuje ZSIK(B) pomalejší rozvoj hoření než je u klasické ZS. Konec hlavní fáze hoření se ZSIK(B) je v těchto režimech posunutý více do oblasti expanzního zdvihu (zejména v nízkých otáčkách motoru). V režimech středního a plného zatížení motoru vykazuje ZSIK(B) větší dynamiku počáteční fáze hoření i kratší celkovou dobu hoření palivovzdušné směsi ve válci.

V grafech na obrázcích 5.13, 5.14 a 5.15 je začátek celkového průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci pro jednotlivé případy určen hodnotou předstihu zážehu určenou aritmetickým průměrem zaznamenaných hodnot v průběhu provozu v ustáleném provozním režimu. Trvání významných fází průběhu hoření v závislosti na otáčkách a zatížení pro klasickou ZS a ZSIK(B) je dobře vidět v grafech na obrázcích 5.16, 5.17 a 5.18. Označení (Q5-Q0) popisuje počáteční fázi rozvoje hoření, označení (Q90-Q10) potom popisuje hlavní fázi hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru.

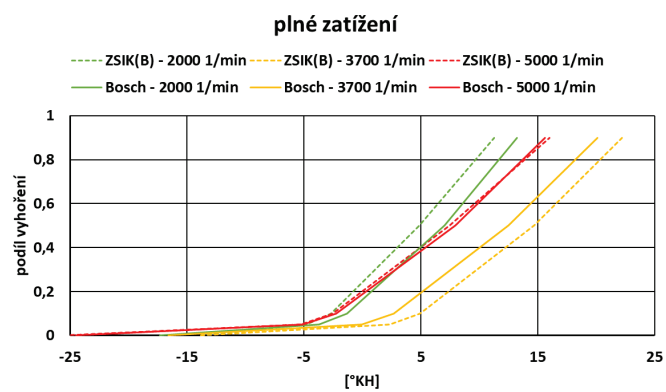




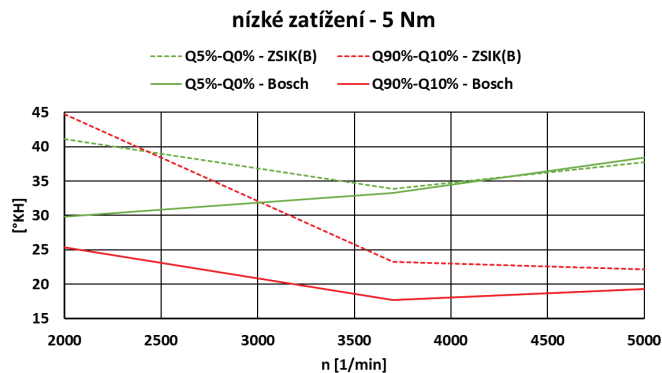
Obrázek 5.13: Průběhy vyhořívání náplně v 1. válci při velmi nízkém zatížení v nízkých, středních a jmenovitých otáčkách motoru.



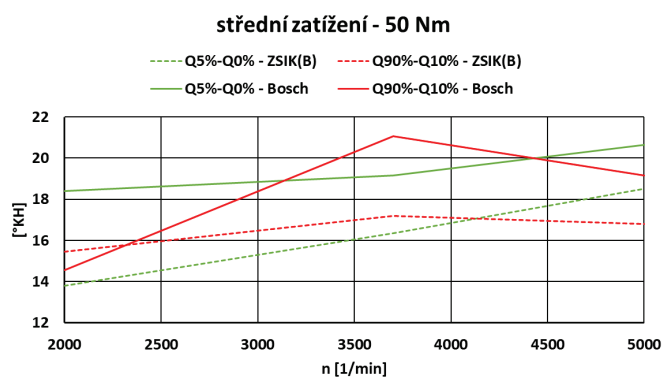
Obrázek 5.14: Průběhy vyhořívání náplně v 1. válci při středním zatížení v nízkých, středních a jmenovitých otáčkách motoru.



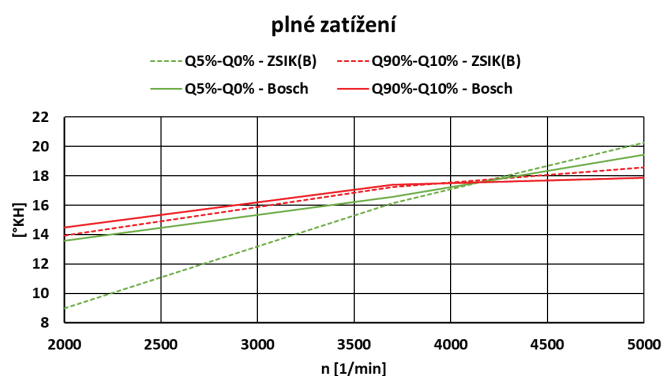
Obrázek 5.15: Průběhy vyhořívání náplně v 1. válci při plném zatížení v nízkých, středních a jmenovitých otáčkách motoru.



Obrázek 5.16: Trvání počáteční fáze rozvoje hoření (Q5-Q0) a hlavní fáze (Q90-Q10) hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru v závislosti na otáčkách pro klasickou ZS a ZSIK(B) - nízké zatížení.



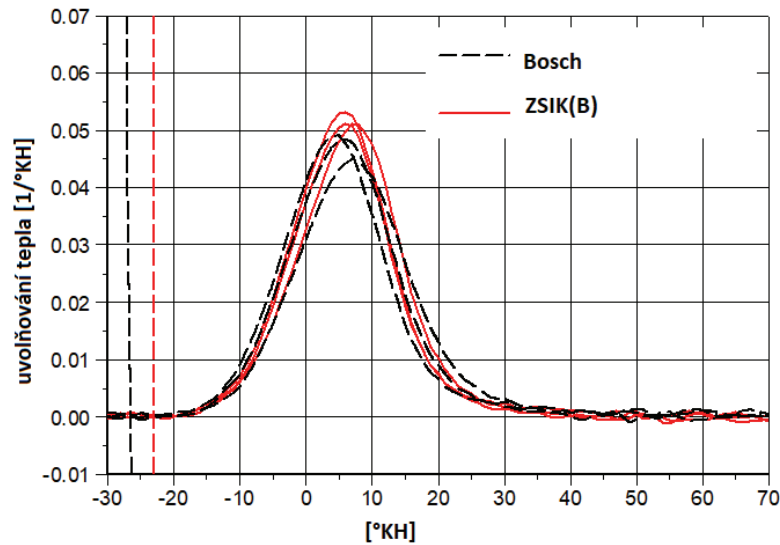
Obrázek 5.17: Trvání počáteční fáze rozvoje hoření (Q5-Q0) a hlavní fáze (Q90-Q10) hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru v závislosti na otáčkách pro klasickou ZS a ZSIK(B) - střední zatížení.



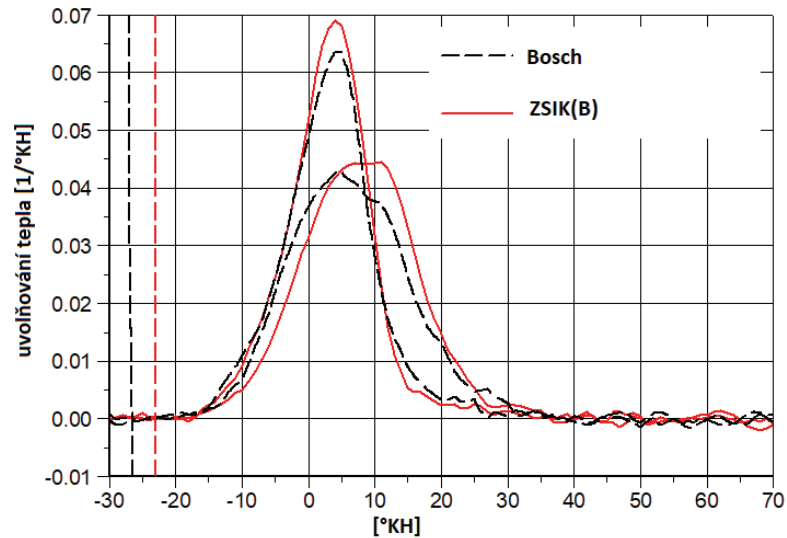
Obrázek 5.18: Trvání počáteční fáze rozvoje hoření (Q5-Q0) a hlavní fáze (Q90-Q10) hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru v závislosti na otáčkách pro klasickou ZS a ZSIK(B) - plné zatížení.

Výsledkem regulačních zásahů EŘJ (sériové i „otevřené“) po detekci klepání v některém válci je změna předstihu zážehu (ale i možná změna bohatosti, resp. obohacení palivovzdušné směsi) při měření v režimech s vysokým zatížením. Tento efekt potom může ovlivnit i data v souboru vysokotlaké indikace a výsledek následného vyhodnocení indikátorových diagramů.

Ze statistického hodnocení průběhu hoření je známé, že s rostoucím průtahem zážehu se zvětšuje i jeho variabilita a tím i variabilita vlastního procesu hoření. Velikosti průtahu zážehu pro klasickou ZS a ZSIK(B) jsou patrné z grafu na obrázcích 5.19 a 5.20.



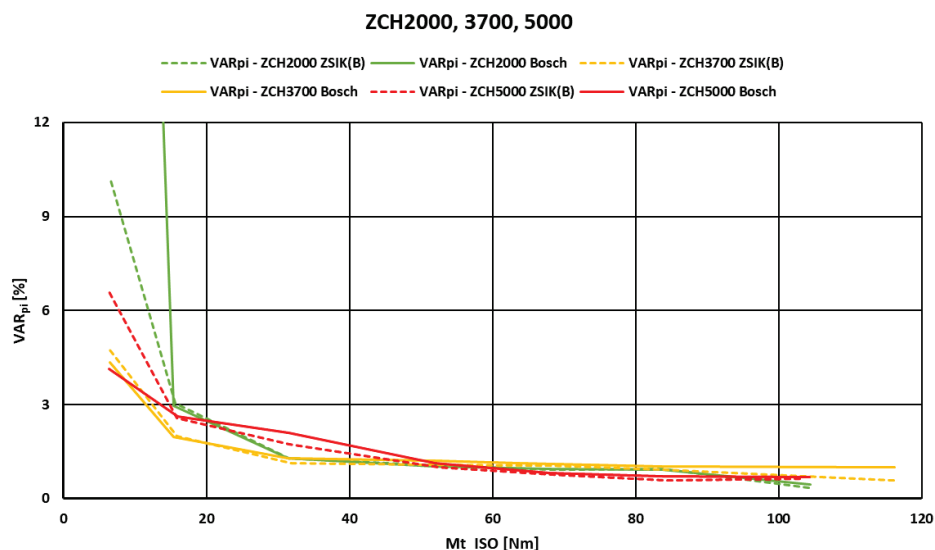
Obrázek 5.19: Porovnání průběhů rychlostí hoření palivovzdušné směsi (uvolňování tepla) ve válcích motoru v provozním režimu 3700 1/min a  $p_i = 6$  bar: svislé čárkované čáry označují předstih zážehu. Rychlost uvolňování tepla je u svíček ZSIK(B) pouze mírně větší, avšak zkrácení průtahu zážehu je evidentní (cca o 5°KH). [A.8]



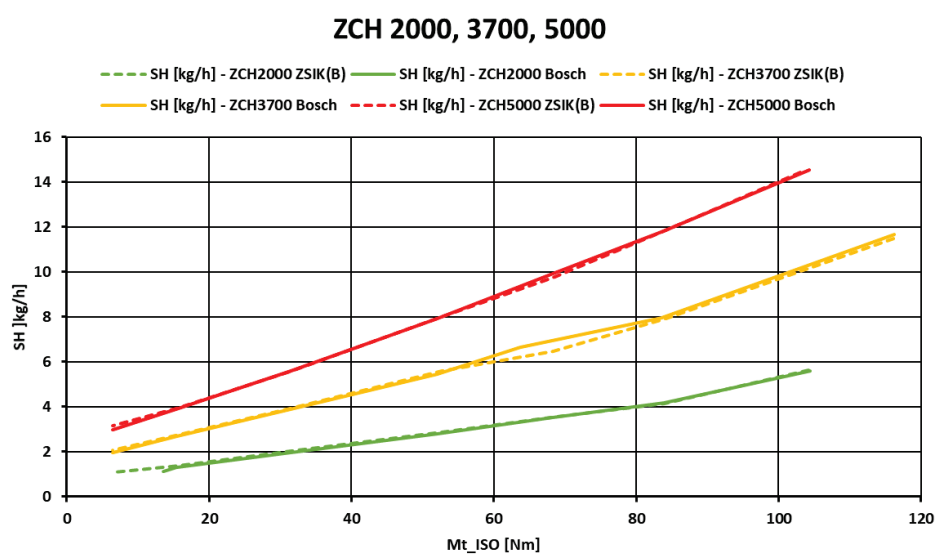
Obrázek 5.20: Porovnání rychlostí hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru v cyklech s nejrychlejším a nejpomalejším průběhem uvolňování tepla v provozním režimu 3700 1/min a  $p_i = 5,2$  bar: kratší průtah zážehu pro ZSIK(B) je zřejmý. [A.8]

### Provozní vlastnosti motoru při zážehu palivovzdušné směsi ZSIK

Provedená měření prokazují snížení variability parametrů průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru i variability parametrů pracovního oběhu při provozu motoru se ZSIK. Z hlediska přínosu pro vnější (a nejdůležitější) kvalitativní ukazatele vozidlového zážehového motoru však měření neukazují efekt ZSIK, který se předpokládal s ohledem na příznivější charakter parametrů hoření a pracovního oběhu. Porovnání mezi klasickou ZS a ZSIK(B) v zatěžovacích charakteristikách ukazují grafy na obrázcích 5.21 a 5.22.

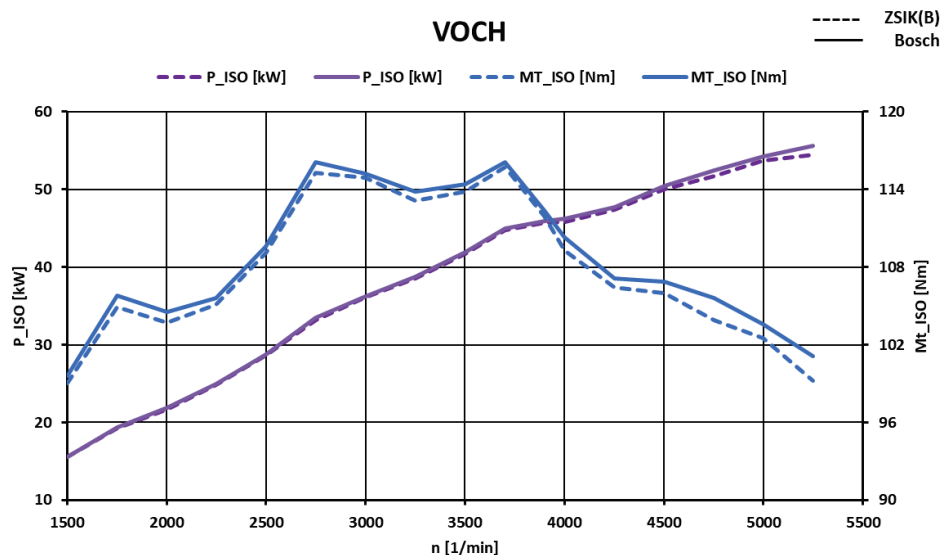


Obrázek 5.21: Průběhy variability středního indikovaného tlaku v režimech zatěžovacích charakteristik: ve většině provozních režimů vykazuje ZSIK nižší hodnoty  $VAR_{pi}$ .

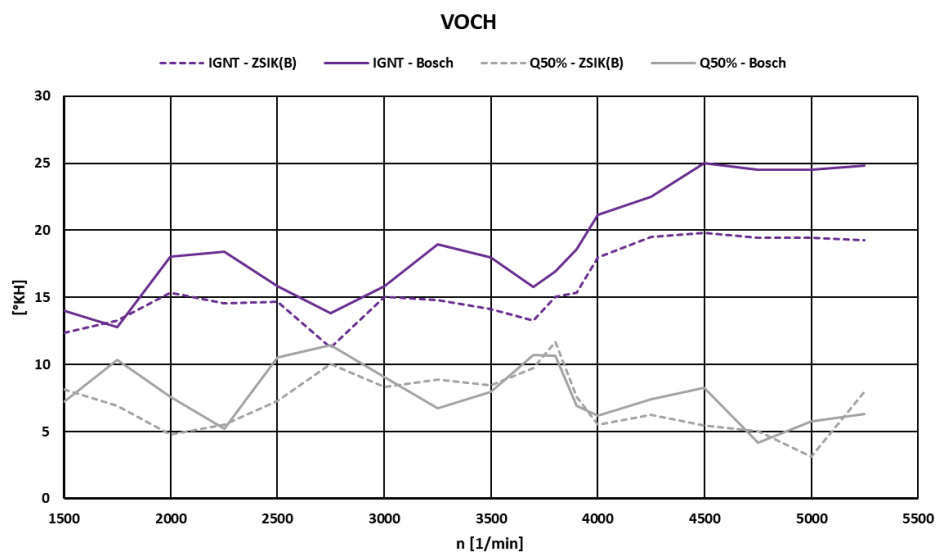


Obrázek 5.22: Průběh spotřeby paliva v režimech zatěžovacích charakteristik (měřené body jsou identické s měřením na obrázku 5.21) ukazuje určitý (malý) nesoulad ve vztahu k vyhodnocení variability středního indikovaného tlaku  $VAR_{pi}$  pro motor s klasickou ZS a ZSIK.

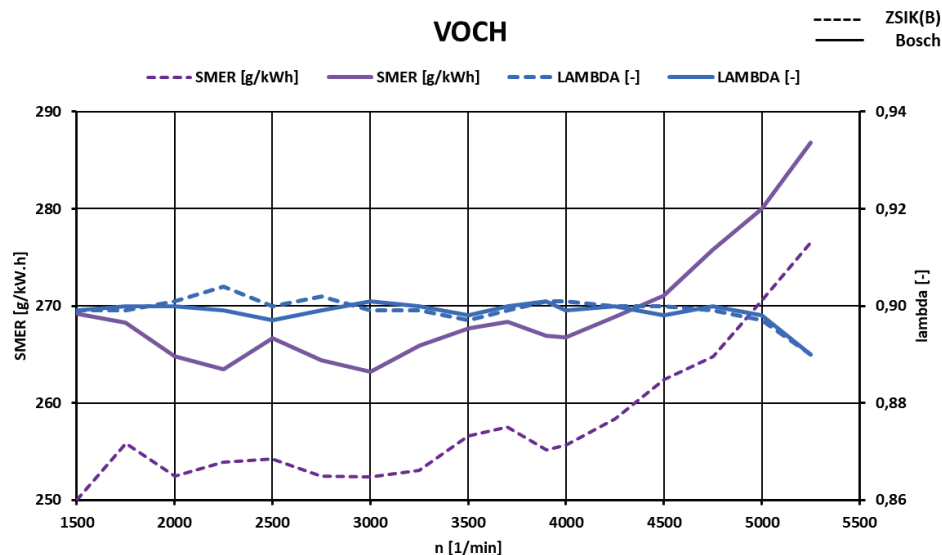
Výsledky měření výkonových parametrů motoru s klasickou ZS a ZSIK(B) ukazují dokonce mírný pokles výkonových parametrů motoru se ZSIK(B). Průběhy vybraných parametrů v režimech VOCH jsou v grafech na obrázcích 5.23, 5.24 a 5.25.



Obrázek 5.23: Změřené snížení hodnoty točivého momentu  $M_t$  a výkonu  $P$  (v grafu jsou zakresleny korigované hodnoty na standardní podmínky) při provozu motoru se ZSIK(B) je zřejmé.



Obrázek 5.24: Poloha 50% vyhoření náplně válce motoru je pro klasickou ZS i ZSIK prakticky shodná. Snížení předstihu zážehu pro ZSIK odpovídá zkrácení průtahu zážehu.



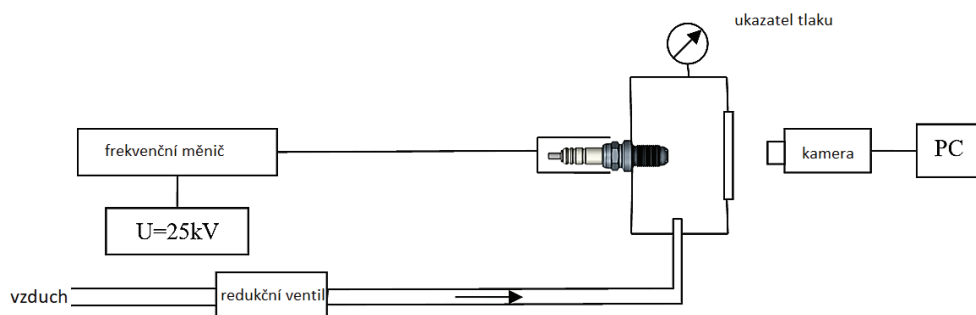
Obrázek 5.25: Průběh součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  se pro klasickou ZS i ZSIK(B) rovněž prakticky shoduje ( $\lambda \cong 0,9$ ). Vyšší hodnoty měrné spotřeby paliva potom korespondují s naměřeným poklesem točivého momentu.

Výsledky měření ukazují pozitivní efekt ZSIK z hlediska parametrů průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci i z hlediska variability parametrů pracovního oběhu motoru. Z tohoto pohledu se ukazuje další výzkum s hledáním optimálního konstrukčního provedení ZSIK jako účelný.

## 5.2 ZSIK s vnitřním objemem $1\text{cm}^3$

Ve spolupráci s BRISK a.s. bylo vyrobeno několik variant ZSIK s různým provedením prodloužené střední elektrody, otvoru ve dně komůrky a zasunutí elektrody do dna komůrky. Pro tyto varianty byl pořízen záznam VN výboje. VN výboj probíhal v tlakové komoře při tlaku 8bar, napětí  $U_{VN}=25\text{kV}$  a frekvenci výboje 3Hz. Schematické znázornění měřicího zařízení pro záznam VN výboje je zobrazen na obrázku 5.26. Snímky ze záznamu se stručnou poznámkou a schematickým znázorněním odlišností jednotlivých variant jsou uvedeny v přehledové tabulce 5.2 níže.



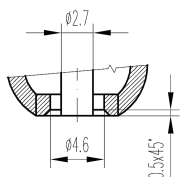


Obrázek 5.26: Schematické znázornění uspořádání měřicího stanoviště pro záznam VN výboje v tlakové komoře. [A.4]

detail spodní partie	fotografie VN výboje	poznámka
		Var. 6.1.1: VN výboj převážně vně pouzdra ZSIK.
		Var. 6.1.2: VN výboj vně i uvnitř pouzdra ZSIK.
		Var. 6.1.3: VN výboj vně i uvnitř pouzdra ZSIK.
		Var. 6.3.1: VN výboj převážně uvnitř pouzdra.
		Var. 6.3.2: VN výboj převážně uvnitř pouzdra.

Tabulka 5.2 – Pokračování na další straně

Tabulka 5.2 – Pokračování z předchozí strany



Var. 6.3.3: VN výboj převážně uvnitř pouzdra.

Tabulka 5.2: Vybrané snímky z videozáznamu VN výboje na jiskřišti ZSIK pro různá provedení prodloužené střední elektrody, otvoru ve dně komůrky a zasunutí elektrody do otvoru dna komůrky.

Pro další experimenty se ZSIK na zkušebním motoru bylo rozhodnuto připravit varianty v provedení jiskřiště 6.1.2. Společnost Brisk pro tyto ZSIK připravila izolátor s prodlouženou střední elektrodou. Dno pouzdra ZSIK bylo opatřeno 3 (dále označováno jako ZSIK - 3 otvory více zapuštěná) a variantně 6 (dále označováno jako ZSIK - 6 otvorů více zapuštěná) „výšlehovými“ kanálky s průměrem 1,6 mm. S těmito variantami byla rovněž porovnávána ZSIK o vnitřním objemu komůrky  $0.95\text{cm}^3$  označovaná v kapitole 5.1 jako varianta D - v této kapitole označována jako ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná.



Obrázek 5.27: Provedení ZSIK s vnitřním objemem komůrky  $1\text{cm}^3$ .

### 5.2.1 Výsledky měření

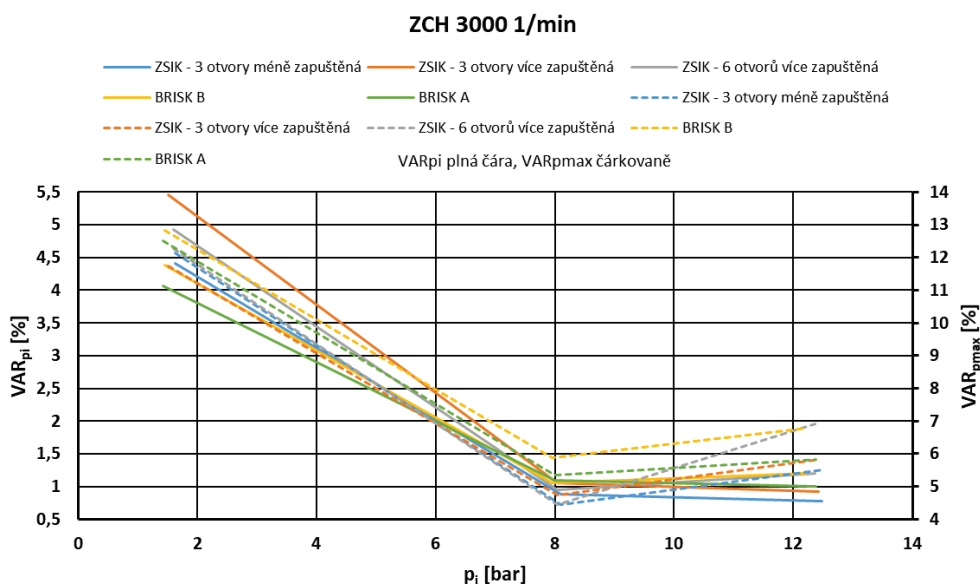
Po zkušenostech z dřívějších měření (a především s ohledem na časovou náročnost zpracování výsledků) byl rozsah měření na motoru poněkud zredukován (v zatěžovacích charakteristikách na 3 úrovně zatížení: nízké, střední a vysoké). Zkušební motor EA111.03E byl vybaven standardní sériovou EŘJ. Při měřeních se ZSIK v režimech VOCH se při on-line sledování průběhů tlaků ve válcích motoru ukázaly občasné abnormality (časté zásahy EŘJ do nastavení předstihu zážehu - zřejmě důsledek samozážehů), rozsah měření byl proto omezen do 3700 1/min.

## Parametry pracovního oběhu a parametry průběhu hoření palivovzdušné směsi ve válci motoru

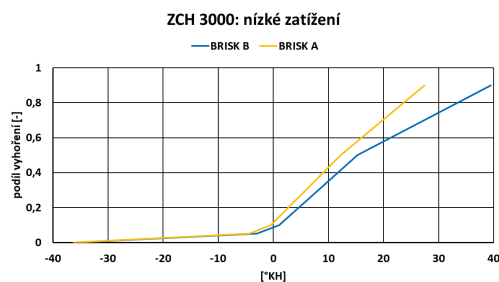
Vybrané výsledky z grafického zpracování provedených měření jsou na obrázcích 5.28 až 5.34. Z parametrů pracovního oběhu byly sledovány pouze variability hodnot středních indikovaných tlaků a maximálních tlaků ve válci motoru. Jejich vzájemné porovnání pro různá provedení ZS je na obrázku 5.28. Ve středních otáčkách a oblasti nízkého až středního zatížení vykazuje nejnižší variability  $VAR_{pi}$  klasická ZS Brisk A, od středního zatížení má nejnižší variabilitu  $VAR_{pi}$  komůrková ZSIK(D) (označ. 3 otvory, méně zapuštěná).

Část hodnocení výsledků z experimentálního výzkumu byla orientována na dynamiku průběhu spalovacího procesu: porovnání ZSIK s klasickými ZS ukazují grafy na obrázcích 5.29, 5.30 a 5.31.

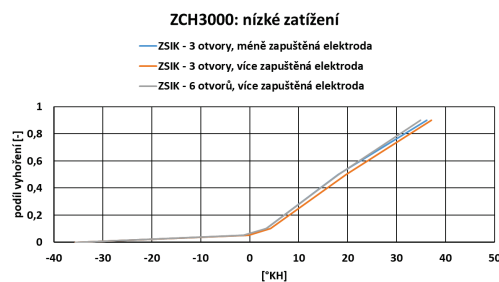
Ukázky souhrnného výsledku ze statistického zpracování termodynamické analýzy změřených tlakových průběhů z vysokotlaké indikace ve všech válcích motoru s určením polohy klikového hřídele při vyhoření 5%, 10%, 50% a 90% palivovzdušné směsi ve válci při provozu motoru s jednotlivými ZS jsou zobrazeny v grafech na obrázcích 5.32, 5.33 a 5.34. Barevné sloupce ukazují střední hodnoty sledovaného parametru a úsečky na sloupcích vyznačují rozsah hodnot (minimum a maximum) sledovaného parametru v souboru 100 pracovních cyklů motoru.



Obrázek 5.28: Průběh variabilit  $VAR_{pi}$  i  $VAR_{pi,max}$  v závislosti na zatížení pro jednotlivé varianty ZSIK a ZS.

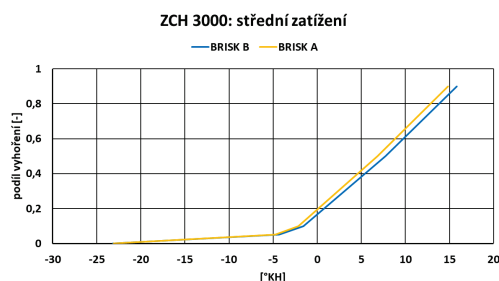


(a)

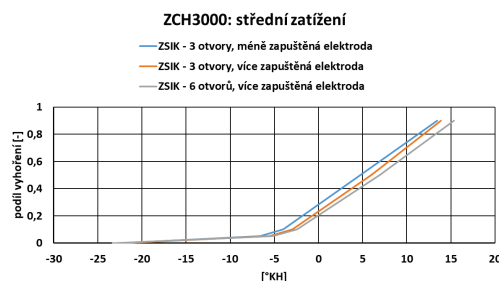


(b)

Obrázek 5.29: V režimu velmi nízkého zatížení zážehového motoru je průtah zážehu relativně velký (pro znázorněný případ cca 30°KH) jak pro klasickou ZS, tak pro ZSIK. Významný vliv má zřejmě zvýšený podíl zbytkových plynů v čerstvé palivovzdušné směsi a u ZSIK i snížený obsah čerstvé palivovzdušné směsi v komůrce.

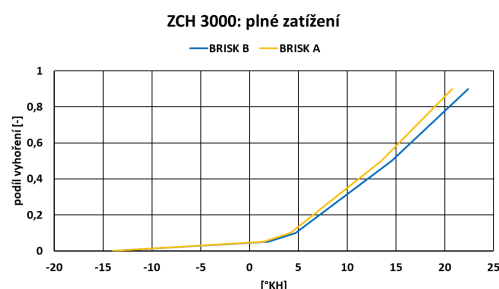


(a)

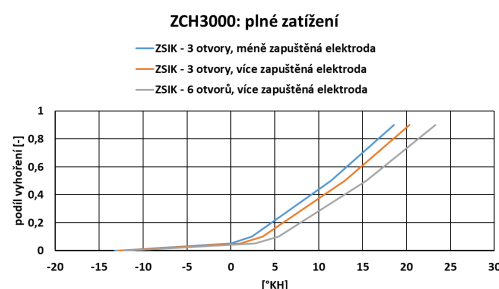


(b)

Obrázek 5.30: V režimech středního zatížení motoru vykazují ZSIK proti klasickým ZS poněkud kratší průtah zážehu i malé zvýšení dynamiky vyhořívání palivovzdušné směsi ve válci.

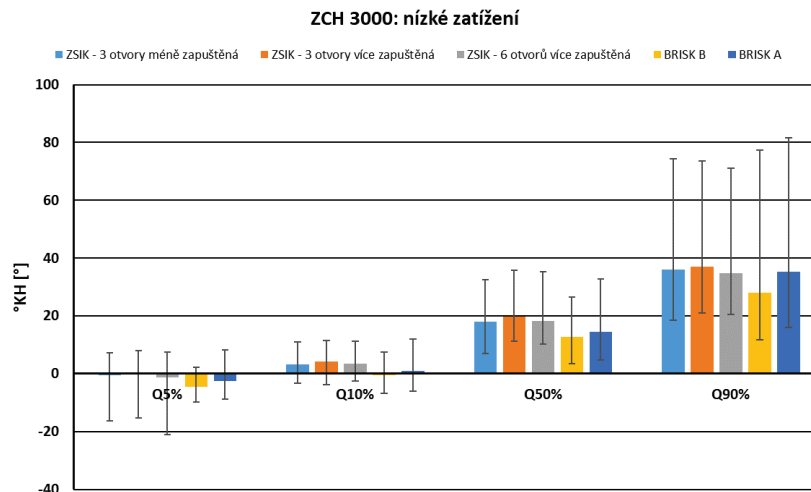


(a)

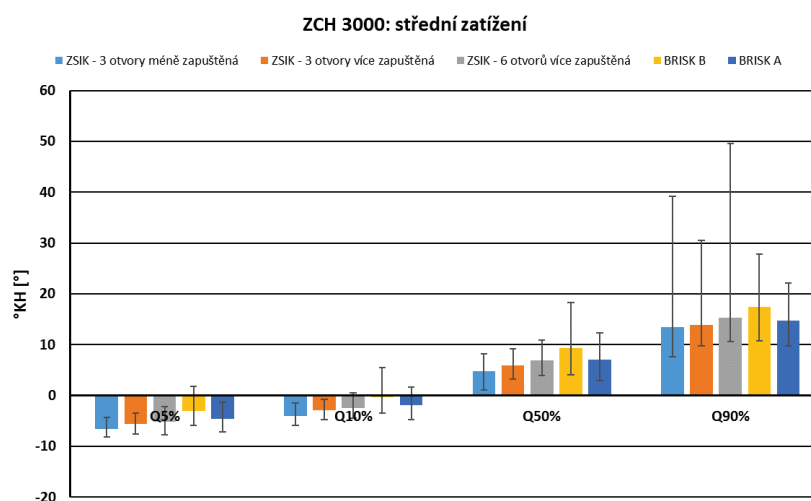


(b)

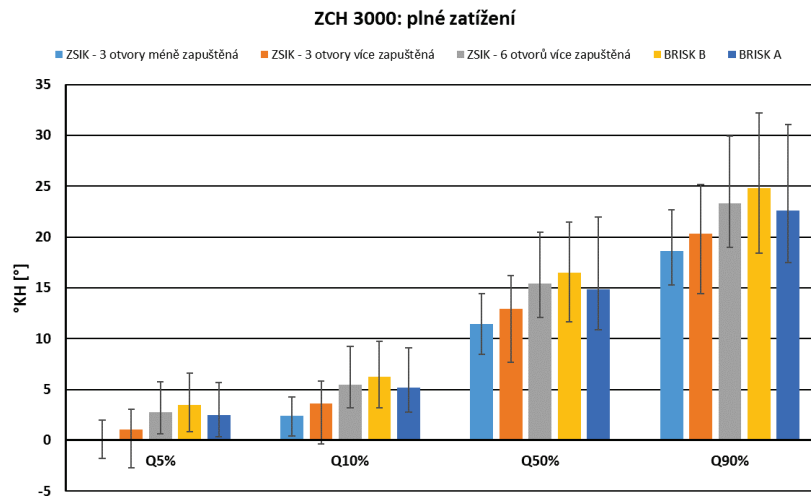
Obrázek 5.31: V režimech vysokého zatížení lze vzájemné porovnání vlivu ZSIK a klasické ZS popsat podobně jako pro režimy středního zatížení motoru na obrázku 5.30. Mírně rozdílné průběhy vyhořívání náplně ve válci motoru při zážehu klasickou ZS i ZSIK ukazují pravděpodobný vliv konstrukčních odlišností v provedení jednotlivých ZS.



Obrázek 5.32: Charakteristické body na průběhu vyhořívání náplně válce v režimech velmi nízkého zatížení při zážehu palivovzdušné směsi různými ZS. Větší dynamiku vyhořívání palivovzdušné směsi mají ZS BRISK, ze ZSIK se jim přibližuje varianta se 3 otvory a více zapuštěnou střední elektrodou. Měření ale může být ovlivněno provozním seřízením (předstihem a bohatostí palivovzdušné směsi), které je nastavováno EŘJ podle okamžité provozní situace a do činnosti a algoritmu EŘJ nelze nijak zasahovat.



Obrázek 5.33: Charakteristické body průběhu vyhořívání palivovzdušné směsi ve válci v režimech středního zatížení motoru při zážehu různými ZS. Z hlediska dynamiky průběhu hoření (podle polohy charakteristických bodů na poloze KH) se ukazují všechny varianty ZSIK téměř srovnatelné s klasickou ZS BRISK A. Zatím nevysvětleným problémem pro ZSIK je větší proměnlivost celkové délky hlavní fáze hoření (Q90%) proti klasickým ZS.



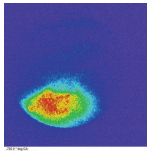
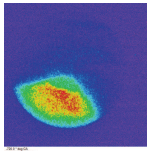
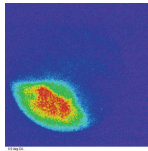
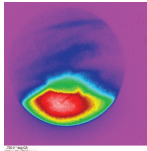
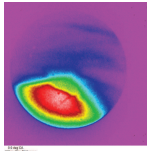
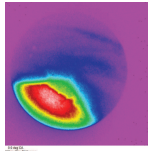
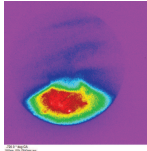
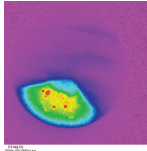
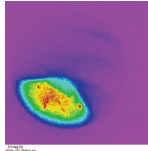
Obrázek 5.34: Charakteristické body průběhu vyhořívání palivovzdušné směsi ve válci v režimech vysokého zatížení motoru při zážehu různými ZS. Nejvýhodnější průběh vyhořívání palivovzdušné směsi ve válci vykazuje ZSIK se 3 „výšlehovými“ otvory a méně zapuštěnou střední elektrodou v centrálním otvoru dna komůrky (pouzdra ZS).

### Snímky rozvoje hoření pro ZSIK

Pro porovnání zapalovacích svíček byla provedena vizualizace hoření od zážehu až do pokročilého rozvoje hoření. Vizualizace byla provedena v režimech středních otáček motoru při velmi nízkém (6Nm), středním (67Nm) a plném zatížení. Po posouzení vhodnosti zobrazení sledovaných dějů ve válci endoskopy s odklonem optiky jak 30° tak 60° byla pro zobrazení výsledků zvolena varianta endoskopu s odklonem 60°.

Pořízené snímky ukazují situaci ve válci od zážehu až do HÚ s postupem po 2 stupních polohy klikového hřídele (tj. s časovým krokem  $\Delta\tau = 0,11\text{ms}$ ). Snímky jsou výsledkem statistického zpracování 10 zaznamenaných „obrazů“ ve válci v každé jednotlivé poloze klikového hřídele. Kompletní zobrazení z důvodu značné obsáhlosti uvedeno v příloze A.4.

V následující tabulce jsou uvedeny pouze snímky stavu rozvoje hoření v HÚ, tj. prakticky na počátku hlavní fáze hoření.

	3 otvory méně zapuštěná	3 otvory více zapuštěná	6 otvorů více zapuštěná
velmi nízké zatížení			
střední zatížení			
vysoké zatížení			

Tabulka 5.3: Snímky stavu rozvoje hoření v HÚ pro různé varianty ZSIK.



## 6 Tepelné namáhání

Z důvodu občasného poškození střední elektrody (viz. obrázek 6.1) při vyšším zatížení motoru způsobeným pravděpodobně tím, že ZSIK je více vystavena tepelnému působení a teploty na konci střední elektrody mohou být vyšší než u klasické ZS bylo přistoupeno k měření teplot jak na klasické ZS, tak i na ZSIK. Následně byly vytvořeny 3D modely variant ZSIK a tepelné namáhání bylo ověřováno i výpočtově. Výsledky z měření teplot poté posloužily k ověření správnosti modelů tepelného namáhání jak klasické ZS, tak zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou.

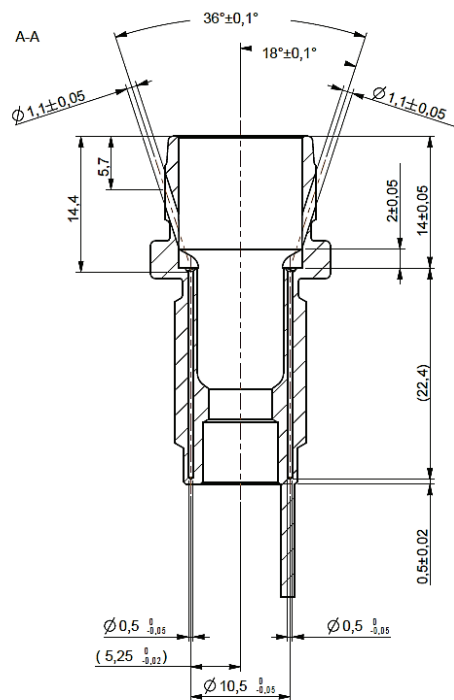


Obrázek 6.1: Pohled na poškozenou střední elektrodu ZSIK.

Tato část práce byla publikována v [A.1, A.2, B.31].

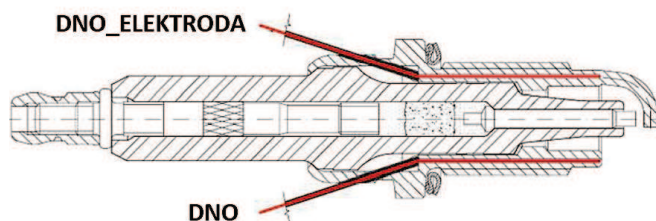
### 6.1 Měření teplot v pouzdře zapalovací svíčky

Pro zjištění reálného tepelného namáhání nejspodnější partie zapalovací svíčky byla upravena pouzdra (jak klasické svíčky, tak ZSIK) svíčky ve spolupráci s firmami BRISK a.s. a SMALL HOLE DRILLING Ltd. V pouzdře klasické zapalovací svíčky byly umístěny dva otvory o průměru  $D=0,46\text{mm}$  tak, že byly  $0,5\text{ mm}$  ode dna pouzdra zapalovací svíčky (celková délka mikrovývrtu  $22,4\text{ mm}$ ). Otvory byly vůči sobě pootočený o  $180^\circ$  kolem svislé osy. Jeden otvor byl tedy situován do vnějšího pláště pouzdra zapalovací svíčky a druhý byl situován dle vnější elektrody klasické zapalovací svíčky. Na tyto dva otvory navazují uvnitř pouzdra svíčky otvory o průměru  $D=1,1\text{mm}$  odkloněné pod úhlem  $18^\circ$  od svislé osy pouzdra zapalovací svíčky (viz. obrázek 6.2).



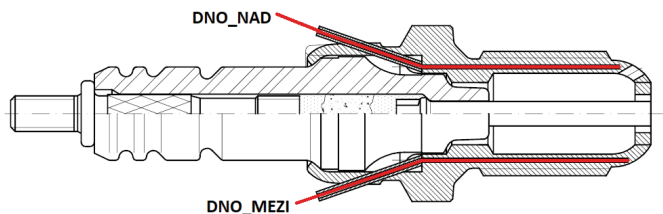
Obrázek 6.2: Úprava pouzdra klasické zapalovací svíčky - řez pouzdrům. Dlouhá část vpravo dole zobrazuje vnější elektrodu, která je později vytvarována.

Po sestavení zapalovací svíčky do funkčního celku byly poté vloženy (a zafixovány) vodicí trubičky pro opláštěvaný termočlánek (typ J - průměr 0,25mm značených DNO\_ELEKTRODA a DNO viz. obrázek 6.3).



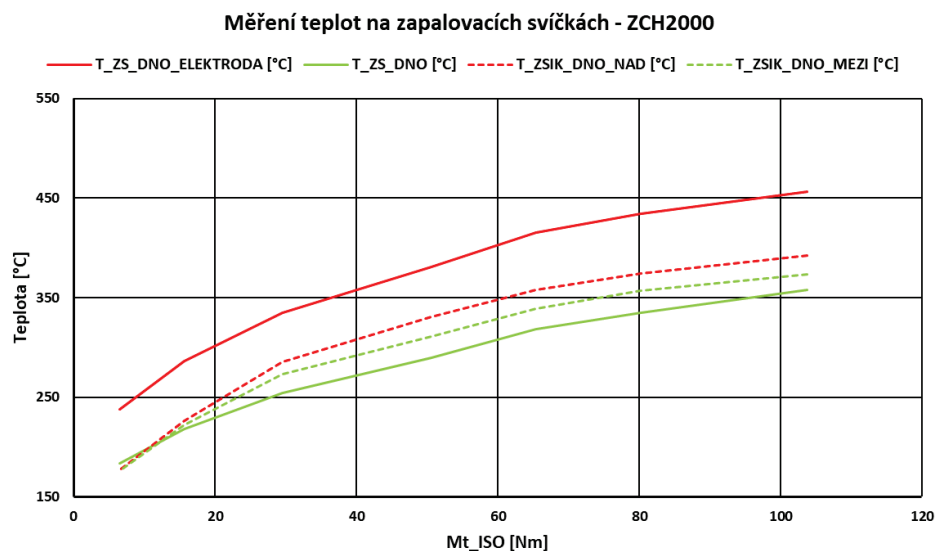
Obrázek 6.3: Umístění a značení termočláneků v pouzdře klasické zapalovací svíčky.

Na obrázku 6.4 je zobrazeno pouzdro měřicí komůrkové svíčky. Po obvodu pouzdra jsou, podobně jako u měřicího pouzdra klasické svíčky, vyvrtány 2 otvůrky o průměru  $D=0,46$  mm pro umístění termočláneků až do nejspodnější partie svíčky. Jeden opět umístěn 0,5mm od spodní hrany dna zapalovací svíčky (mezi výšlehovými otvůrkami), druhý byl umístěn v pouzdře svíčky nad výšlehovými otvůrkami.

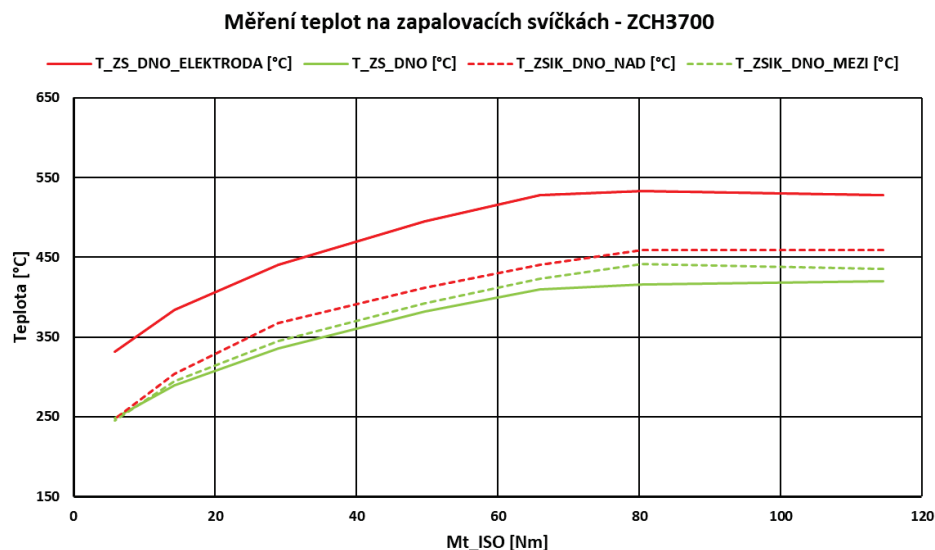


Obrázek 6.4: Umístění a značení termočlánků v tělese zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou.

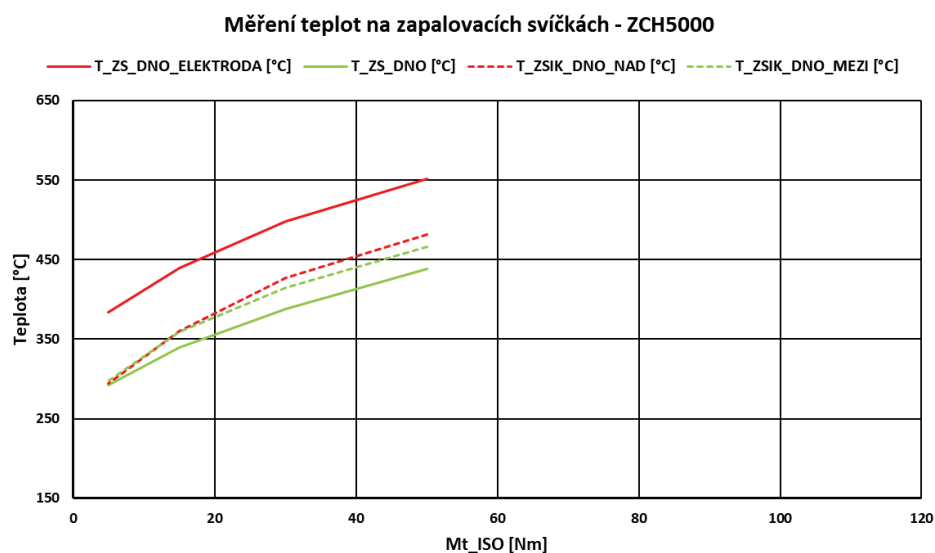
Program měření na upravených klasických zapalovacích svíčkách uzpůsobených pro měření teplot proběhl v rozsahu vnější otáčkové charakteristiky a několika zatěžovacích charakteristik. Program měření s upravenými zapalovacími svíčkami s integrovanou komůrkou proběhl z technických důvodů (zkrat na střední elektrodě - provoz motoru v tzv. nouzovém režimu při ZCH5000) pouze v režimech zatěžovacích charakteristik. Výsledky (průměrné ustálené hodnoty) jsou zpracovány a graficky porovnány v grafech na obrázcích 6.5, 6.6 a 6.7.



Obrázek 6.5: Průběhy změřených teplot na zapalovacích svíčkách při ZCH2000.



Obrázek 6.6: Průběhy změřených teplot na zapalovacích svíčkách při ZCH3700.



Obrázek 6.7: Průběhy změřených teplot na zapalovacích svíčkách při ZCH5000.

## 6.2 Modelování teplotního pole

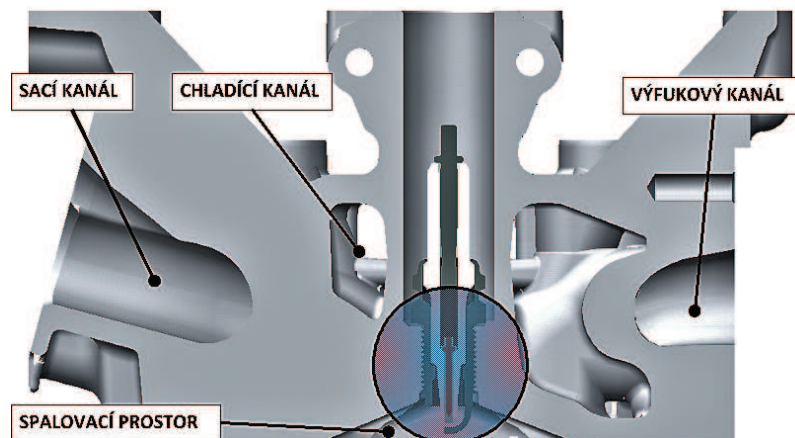
Pro modelování teplotního pole byl použit software CREO Parametric 2.0 a jeho nástavba pro výpočet tepelného namáhání pomocí metody konečných prvků - Creo Simulate. Model pro výpočet je uvažován jako poloviční model s řezem v ose zapalovací svíčky. Na výpočtový model byly následně aplikovány okrajové podmínky. Pro sací, výfukový a chladičí kanál motoru byla použita okrajová podmínka s názvem

*Convection condition*, kde se jedná o přestup tepla určený teplotou a velikostí součinitele přestupu tepla. Pro plochu spalovacího prostoru a jednotlivé komponenty zapalovací svíčky byla užita okrajová podmínka *Heat load*, kde je zadávána hodnota vypočteného tepelného toku. Výpočtový model byl porovnáván se změřenými teplotami na klasické i komůrkové zapalovací svíče.

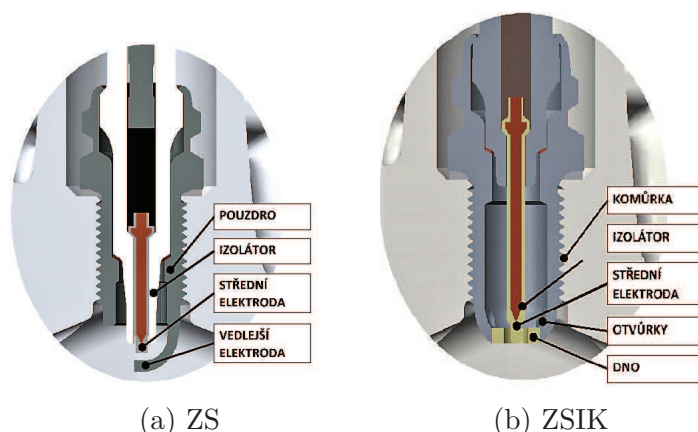
Výpočtové modely byly provedeny pro 3 varianty ZSIK s vnitřním objemem  $1\text{cm}^3$  (v této práci značeno jako 3 otvůrky méně zapuštěná, 3 otvůrky více zapuštěná, 6 otvůrků více zapuštěná) a pro klasickou zapalovací svíčku (v práci uváděna buď jako Brisk A nebo Bosch). Z důvodu výše uvedeného problému s občasným poškozením střední elektrody byla modelována i do budoucna uvažovaná varianta, která má zkrácenou střední elektrodu a poté prodlouženou o wolframovou "tyčku" (o průměru  $D=1,6\text{ mm}$ ), která bude upevněna do elektrody technologií vysokoteplotního vakuového pájení.

### 6.2.1 Okrajové podmínky

Modely komponentů jednotlivých zapalovacích svíček byly vytvořeny buď dle výkresové dokumentace (v případě klasické ZS od firmy Brisk), případně byly použity modely ZSIK, které sloužily pro tvorbu výkresové dokumentace. Model hlavy válců byl použit na základě obdržných dat ze Škoda auto - použit byl model odpovídající hlavě válců motoru na brzdovém stanovišti, tedy hlava se 4 ventilovou technikou motoru EA111.03E. Způsob označování jednotlivých hlavních míst pro zadávání okrajových podmínek je zobrazen na obrázcích níže.



Obrázek 6.8: Způsob označování jednotlivých hlavních míst pro zadávání okrajových podmínek - hlava válců.



Obrázek 6.9: Způsob označování jednotlivých hlavních míst pro zadávání okrajových podmínek - zapalovací svíčky.

Na základě změřených teplot v pouzdře zapalovací svíčky (jak klasické, tak komůrkové), byl i dle předchozích zkušeností na KVM a zkušeností Mikulanina [28], který řešil podobný model ve své diplomové práci, proveden zjednodušený výpočet pro dva otáčkové režimy (3700 a 5000 1/min). Teploty při otáčkách 3700 1/min byly na svíčkách změřeny a na jejich základě byly vypočtené hodnoty porovnávané se změřenými. Z tohoto porovnání, které ukázalo dobrou shodu v měřených a výpočtových bodech, poté vycházel model pro režim 5000 1/min.

Zadávané hodnoty vypočteného tepelného toku pro jednotlivá místa jsou uváděny v tabulce 6.1 níže.

Typ okrajové podmínky	Označení místa v modelu	Zadávaná hodnota	
		3700 [1/min]	5000 [1/min]
Heat	spalovací prostor	0,62 W·mm <sup>2</sup>	1,01 W·mm <sup>2</sup>
Heat	izolátor	0,62 W·mm <sup>2</sup>	1,01 W·mm <sup>2</sup>
Heat	komůrka	0,62 W·mm <sup>2</sup>	1,01 W·mm <sup>2</sup>
Heat	otvůrky	0,62 W·mm <sup>2</sup>	1,01 W·mm <sup>2</sup>
Heat	dno	0,62 W·mm <sup>2</sup>	1,01 W·mm <sup>2</sup>
Heat	střední elektroda	0,62 W·mm <sup>2</sup>	1,01 W·mm <sup>2</sup>
Convection	sací kanál	55°C; 0,3	
Convection	výfukový kanál	750°C; 0,5	
Convection	chladičí kanál	95°C; 4	
Temperature	izolátor	100°C	

Tabulka 6.1: Vybrané zadávané parametry v jednotlivých výpočtových modelech.

Na pouzdro svíček byl použit předdefinovaný materiál ze SW Creo Parametric,

kteřý svými vlastnostmi odpovídá použité oceli ČSN 11110. V SW a i níže v popisu v tabulce 6.2 s materiály je označován „Steel“. Stejný materiál byl použit i na vnější podložku a svorník zapalovací svíčky. Materiál střední a vedlejší elektrody klasické a dna pouzdra komůrkové svíčky je vyroben z 99% slitiny niklu. V softwaru byl proto nadefinován materiál „Nikl\_slitina“ s odpovídajícími fyzikálními vlastnostmi. Pro izolátory obou provedení zapalovací svíčky byl nadefinován materiál „Al2O3“, který svými vlastnostmi odpovídá oxidu hliníku, z něhož jsou v současnosti izolátory vyráběny. Pro měděné jádro střední elektrody a vnitřní těsnicí podložku byl použit předdefinovaný materiál „Cu“ – měď. Pro křemíkový odporový zátav byl nadefinován materiál „Kremik“. Přesné složení materiálu hlavy válců, a tím i jeho fyzikální vlastnosti výrobce neuvádí. Proto byla použita předdefinovaná slitina hliníku s označením „Al2014“, která podle předpokladů nejvíce odpovídá skutečnosti. Pro případ do budoucna uvažované varianty se střední elektrodou prodlouženou o wolframovou „tyčku“ byl do konkrétního modelu zaveden materiál s označením „Wolfram“.

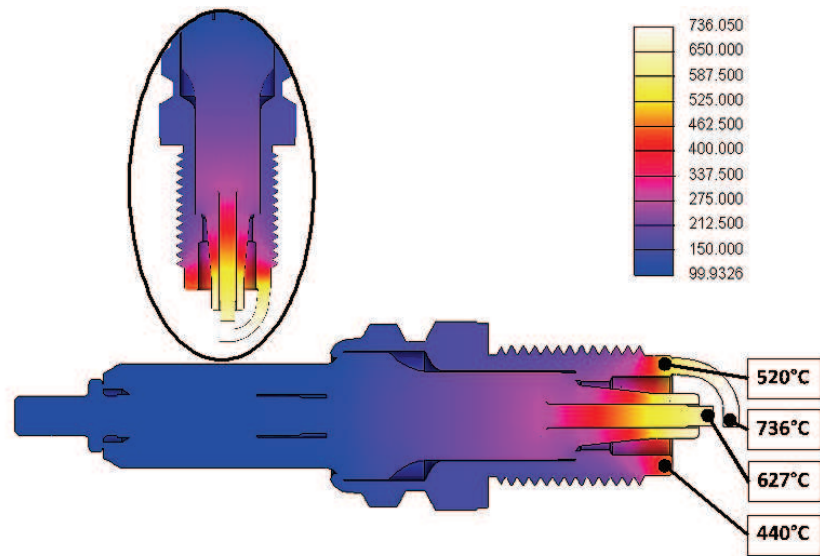
Označení materiálu	Hustota [kg·m <sup>-3</sup> ]	Tepelná kapacita [J·K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]
Al2014	2793	963	160
Al2O3	3690	880	20
Cu	8920	377	360
Kremik	2329	710	150
Nikl_slitina	8900	440	71
Steel	7827	473	43
Wolfram	19250	134	173

Tabulka 6.2: Parametry zadávaných materiálů v jednotlivých výpočtových modelech.

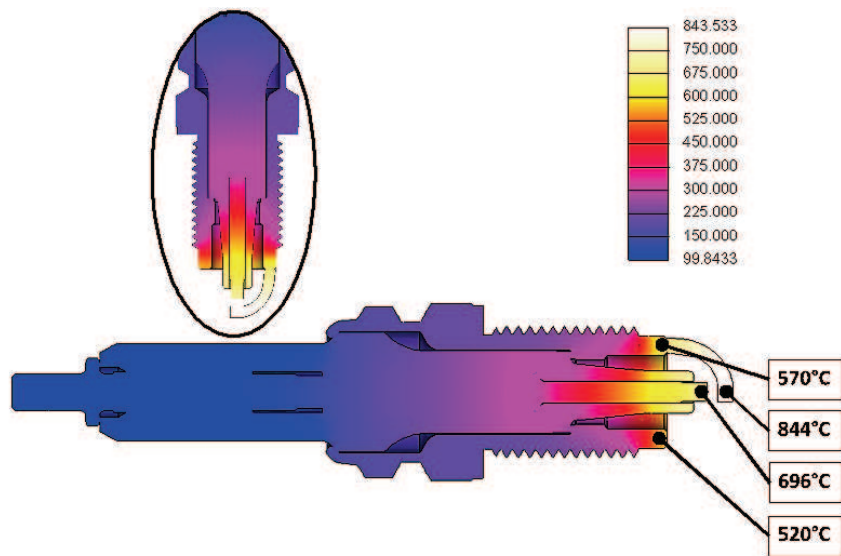
### 6.2.2 Výsledky modelování teplotního pole

Následující obrázky 6.10 až 6.19 zobrazují simulační modely teplotních polí pro jednotlivé varianty zapalovacích svíček. Níže uvedené obrázky ukazují vliv celkového počtu a polohy otvůrků na celkové teplotní namáhání nejspodnější partie ZSIK, rovněž i vliv délky střední elektrody na maximální dosahovanou teplotu. Uvedené výsledky modelů klasické ZS a ZSIK se shodují s výsledky s měřením teplot ve stejných místech. V případě do budoucna uvažované varianty ZSIK s prodlouženou střední elektrodou o wolframovou „tyčku“ došlo při výpočtu ke zvýšení maximální teploty na střední elektrodě oproti shodnému modelu bez wolframové „tyčky“ o cca 50°C při otáčkovém režimu 3700 1/min. Naopak při otáčkovém režimu 5000 1/min došlo dle modelu teplotního pole ke snížení maximální teploty na špičce střední elektrody o cca 90°C.

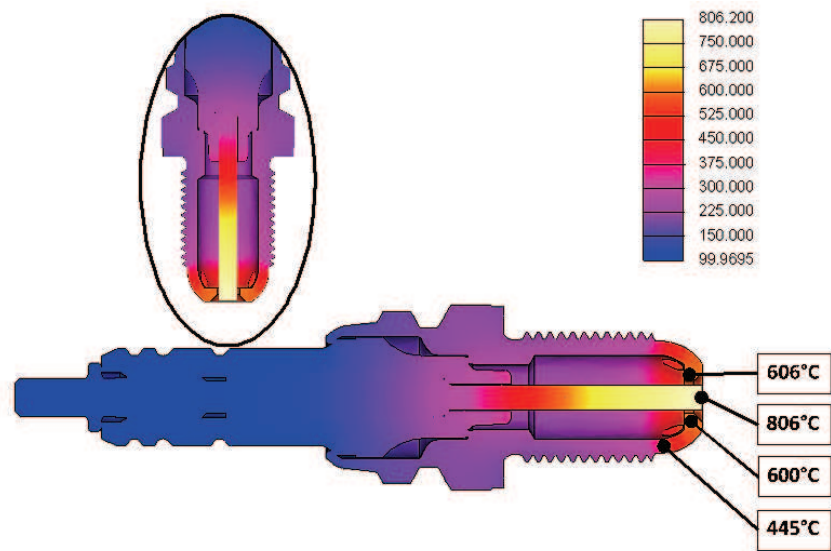




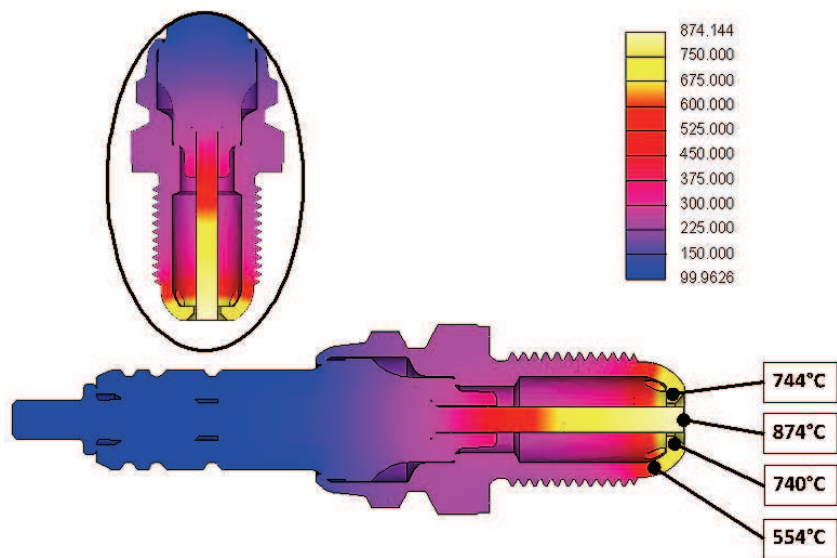
Obrázek 6.10: Tepelná analýza modelu zapalovací svíčky při 3700 1/min.



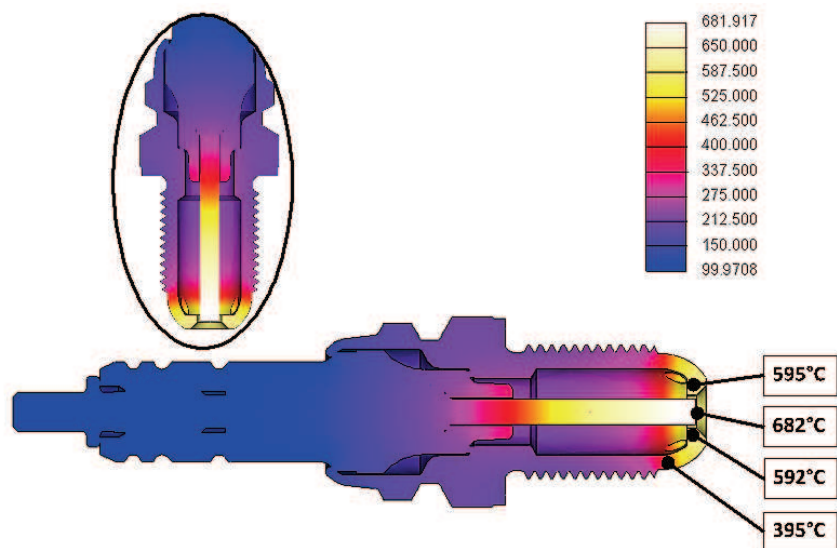
Obrázek 6.11: Tepelná analýza modelu zapalovací svíčky při 5000 1/min.



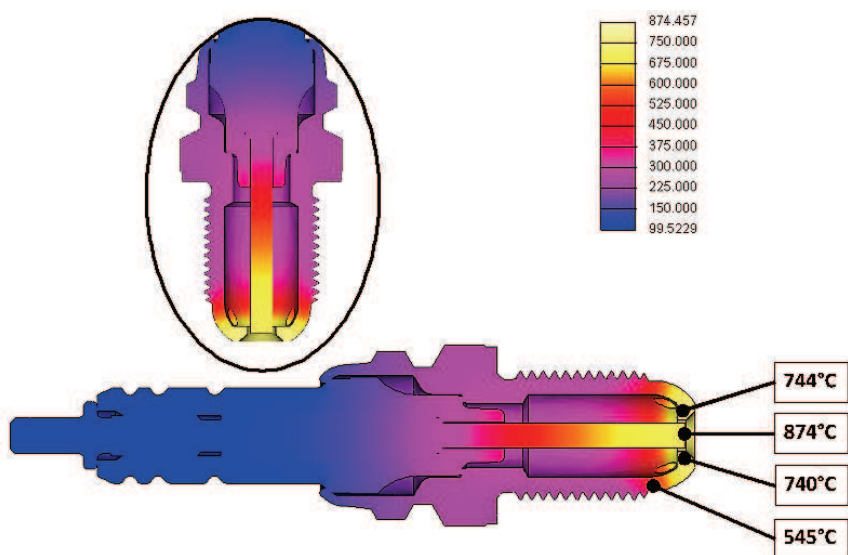
Obrázek 6.12: Tepelná analýza modelu ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná při 3700 1/min.



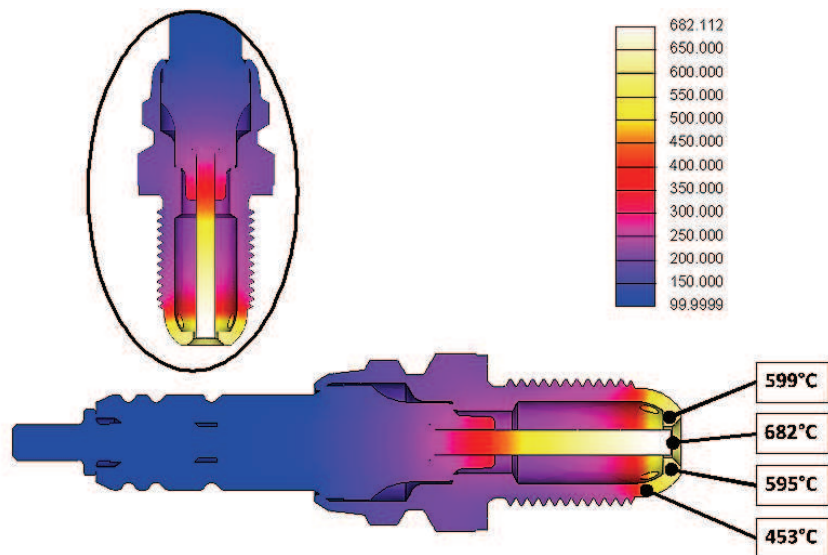
Obrázek 6.13: Tepelná analýza modelu ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná při 5000 1/min.



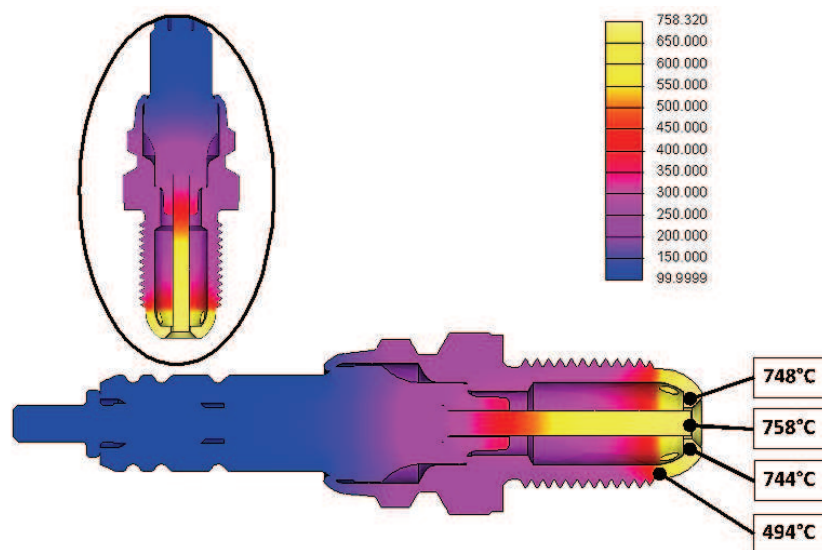
Obrázek 6.14: Tepelná analýza modelu ZSIK - 3 otvory více zapuštěná při 3700 1/min.



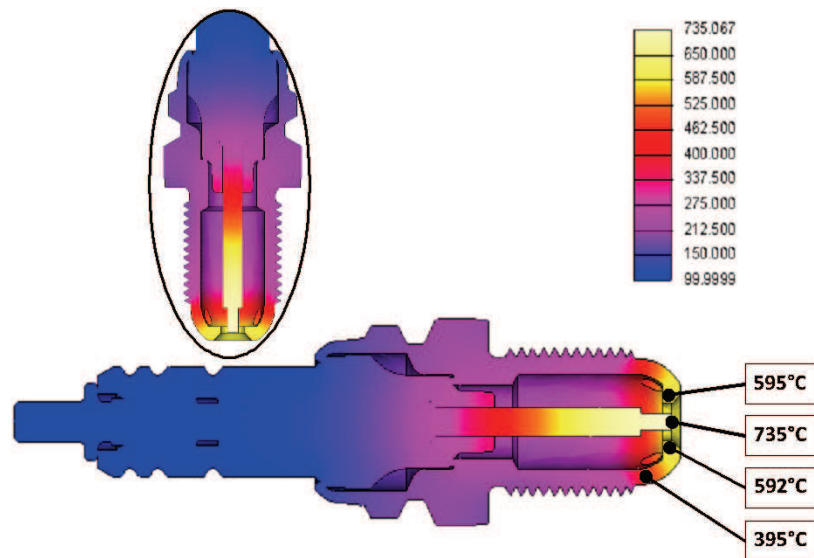
Obrázek 6.15: Tepelná analýza modelu ZSIK - 3 otvory více zapuštěná při 5000 1/min.



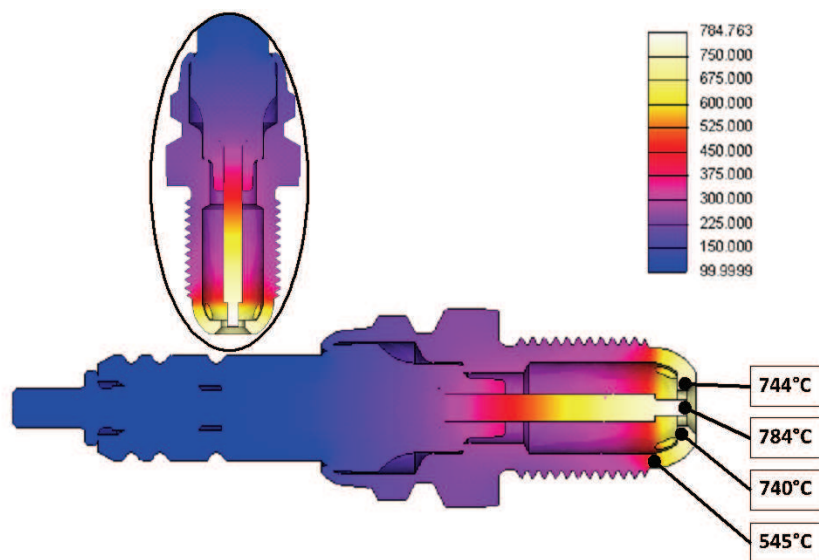
Obrázek 6.16: Tepelná analýza modelu ZSIK - 6 otvorů více zapuštěná při 3700 1/min.



Obrázek 6.17: Tepelná analýza modelu ZSIK - 6 otvorů více zapuštěná při 5000 1/min.



Obrázek 6.18: Tepelná analýza modelu ZSIK - 3 otvory více zapuštěná elektroda s wolframovou "tyčkou" při 3700 1/min.



Obrázek 6.19: Tepelná analýza modelu ZSIK - 3 otvory více zapuštěná elektroda s wolframovou "tyčkou" při 5000 1/min.

## 7 Zhodnocení výsledků

Předložená disertační práce „Iniciace zážehu směsi zapalovací svíčkou“ se zabývá experimentálním výzkumem spalovacího procesu a experimentálním výzkumem a vývojem komůrkového zážehu u zážehových pístových spalovacích motorů.

Úvodní část práce (kapitoly 1 a 2) je věnována popisu současného stavu techniky a poznání, popisuje několik různých způsobů a řešení zapalovacích systémů dohledaných v dostupné literatuře. Avšak ne u všech bylo dohledáno použití v běžné praxi mimo laboratorní prostředí. Dále se pak úvodní část práce věnuje různým řešením komůrkového zážehu palivovzdušné směsi. Dohledaná řešení jsou základně rozdělena na aktivní a pasivní – dle způsobu přívodu paliva do vlastní komůrky. V dostupné literatuře byla dohledána řešení převážně pro stacionární plynové motory, pouze jediné dohledané technické řešení bylo zaměřeno na zážehový motor s benzinovým palivem. Jedná se o řešení od firmy Mahle s označením Mahle-TJI. Toto technické řešení je ale koncipováno jako aktivní – tedy s přívodem paliva do komůrky. V dostupné literatuře nebyly popsány experimenty s pasivním komůrkovým zážehem na malém vozidlovém motoru. Z tohoto důvodu byl v následujících kapitolách experimentální výzkum a vývoj pasivního komůrkového zážehu prováděn na malém (z hlediska zdvihového objemu) vozidlovém motoru s vnější tvorbou směsi.

Samostatná kapitola 3 popisuje zařízení použitá k experimentům. Ta byla používána s ohledem na aktuální dostupnost a stav nejen popsanych zařízení, ale i laboratoří KVM TUL.

Stěžejní část práce je věnována laboratorním experimentům na zážehovém motoru a vyhodnocování změřených dat jak pro různá provedení jiskřiště klasické zapalovací svíčky v kapitole 4, tak pro několik variant zapalovacích svíček s integrovanou komůrkou bez samostatného přívodu paliva (vliv různého konstrukčního provedení a geometrie koncové části – rozdílný vnitřní objem a počet výšlehových otvůrků, provedení střední elektrody) v kapitole 5. Většina experimentů byla z technických důvodů prováděna se standardní motorovou elektronickou řídicí jednotkou. Pouze optimalizační práce na jedné konkrétní variantě zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou byly prováděny s tzv. otevřenou motorovou elektronickou řídicí (umožňující změnu nastavovaných parametrů) jednotkou zapůjčenou ze Škoda auto. Pro termodynamickou analýzu vyhodnocování změřených indikátorových diagramů bylo použito na KVM TUL dostupného komerčního softwaru AVL Concerto.

Výsledky experimentů se zapalovacími svíčkami s integrovanou komůrkou jsou v kapitole 5 dále porovnávány s výsledky experimentů s klasickými zapalovacími svíčkami s různým provedením jiskřiště. Výsledky uváděné v práci ukazují pozitivní vliv způsobu zážehu připravené homogenní směsi na rozvoj počáteční fáze hoření a



potvrzují, že zážeh směsi pomocí zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou má příznivý účinek. To se projevuje snížením průtahu zážehu a rychlejším hořením právě v počáteční fázi hoření. Všechny varianty zapalovacích svíček s integrovanou komůrkou v porovnání s klasickou zapalovací svíčkou vykazovaly od nízkého zatížení po zatížení plně výrazné zlepšení variability středního indikovaného tlaku  $p_i$  i variability maximálního tlaku  $p_{max}$ . Pro velmi nízká zatížení ( $5 \div 15$  Nm) a volnoběh naopak v porovnání s klasickou zapalovací svíčkou docházelo k mírnému zhoršení parametrů variability středního indikovaného tlaku  $p_i$  i variability maximálního tlaku  $p_{max}$ . Ovlivňujícím faktorem pro zvýšení variability parametrů bylo (v případech prvních provedení zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou) při nízkých zatíženích a volnoběžných otáčkách občasné vynechávání zážehu a občasné nezápaly. Experimentální práce rovněž zahrnovaly vizualizaci zážehu a počáteční fáze hoření směsi ve válci motoru.

Z důvodu obsáhlosti jsou pro vybrané varianty klasické zapalovací svíčky s různým provedením jiskřiště a pro několik variant zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou záznamy z vizualizace v přílohách práce, kde jsou rovněž uvedena i podrobnější zpracování výsledků měření pro různé varianty klasické zapalovací svíčky a zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou.

Poslední kapitola (kapitola 6) práce se zabývá tepelným namáháním pouzdra klasické zapalovací svíčky a zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou. V kapitole jsou uvedeny úpravy pouzder obou zmíněných zapalovacích svíček tak, aby bylo možné vložit termočlánky pro změření teplot v požadovaných místech. K tomuto kroku vedly občasné problémy s poškozením střední elektrody (počínající propálení na čele střední elektrody, případně zcela propálená střední elektroda), ke kterým (dle předpokladu) docházelo v důsledku vysokých teplot na střední elektrodě zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou. Získaná data byla poté využita k ověření správnosti modelování teplotních polí na různých variantách zapalovacích svíček s integrovanou komůrkou i klasické zapalovací svíčky. Modelovaná teplotní pole se shodují s měřením.

Při diskuzi k výsledkům a možným variantám zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou bylo v týmu spolupracovníků navrženo nové uspořádání s původním řešením střední elektrody [D.3]. S ohledem na pokračující práce výzkumného programu je navrhováno řešení střední elektrody prodloužené o wolframovou "tyčku", která je kovově připojena k měděnému jádru střední elektrody (technologíí vysokoteplotního vakuového pájení). Toto řešení je uvažováno jako opatření ke snížení teploty na čele střední elektrody. Navrhovaná varianta zapalovací svíčky byla rovněž poslední variantou zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou, na které bylo modelováno teplotní pole pomocí simulačního 3D software v poslední kapitole práce.

Z provedených měření pro různé varianty zapalovacích svíček se ukazuje, že zážeh směsi pomocí zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou má větší potenciál pro zlepšení průběhu spalovacího procesu v zážehovém motoru než různá provedení jiskřiště klasické zapalovací svíčky.



## 7.1 Doporučení na pokračování práce

Další etapa výzkumu komůrkového zážehu by mohla pokračovat studiem elektrických parametrů jiskrového výboje na zapalovací svíčke. Mohla by rovněž zahrnovat i provedení detailnějších zkoušek u výrobce zapalovacích svíček Brisk a.s. zaměřených na zjištění tepelné hodnoty konkrétní zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou a životnostní zkoušky.

### 7.1.1 Měření ionizačního proudu mezi elektrodami zapalovací svíčky

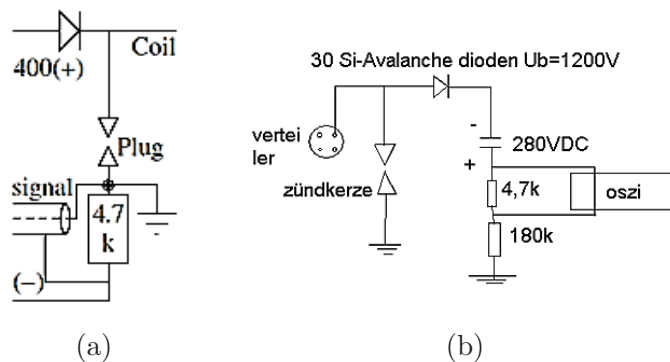
Z důvodu neúspěšné realizace zařízení pro měření ionizačního proudu mezi elektrodami zapalovací svíčky doporučuji využití současné měřicí techniky k dalším experimentům v tomto směru. Níže přikládám dohledaná publikovaná elektrická schémata a rovněž návrh elektrického schématu pro realizaci měření na konkrétní jednojiskrové zapalovací cívice

V kapitole 2.1.2 jsou s odkazem na literární prameny uvedeny stručné informace o významu ionizace plynů a ionizačním proudem. Níže je popsán princip způsobu měření ionizačního proudu a publikovaná elektrická schémata umožňující provést takové měření a rovněž je uveden návrh zařízení k měření ionizačního proudu mezi elektrodami zapalovací svíčky.

#### Měření ionizačního proudu

Zařízení pro měření ionizačního proudu musí umožnit měření ionizačního proudu procházejícího mezi elektrodami zapalovací svíčky v libovolném časovém úseku průběhu pracovního oběhu motoru, tzn. i v době přeskočení elektrické jiskry. Při měření je na elektrody zapalovací svíčky připojen zdroj napětí přibližně 400 V s opačnou polaritou, než je polarita vysokého napětí ze zapalovacího modulu.

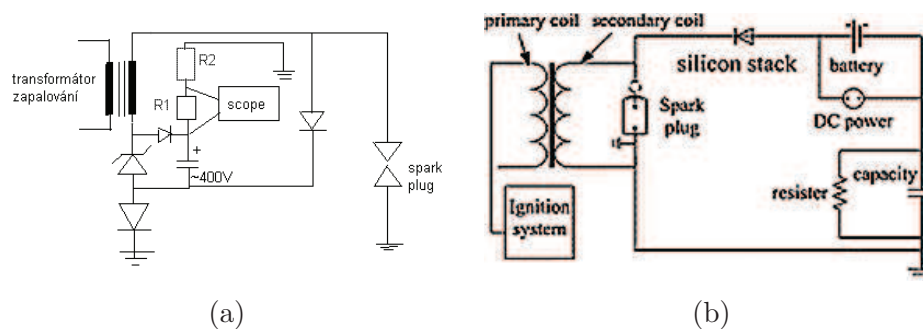
Na obrázcích 7.1, 7.2 a 7.3 jsou elektrická schémata několika elektrických obvodů umožňujících snímání ionizačního proudu, publikovaná v odborné literatuře.



Obrázek 7.1:

a) Schéma elektrického zapojení zařízení k měření ionizačního proudu. Zdroj napětí 400V. Průběh ionizačního proudu se získá prostřednictvím napětového signálu z odporu 4,7k $\Omega$ . Převzato z [44].

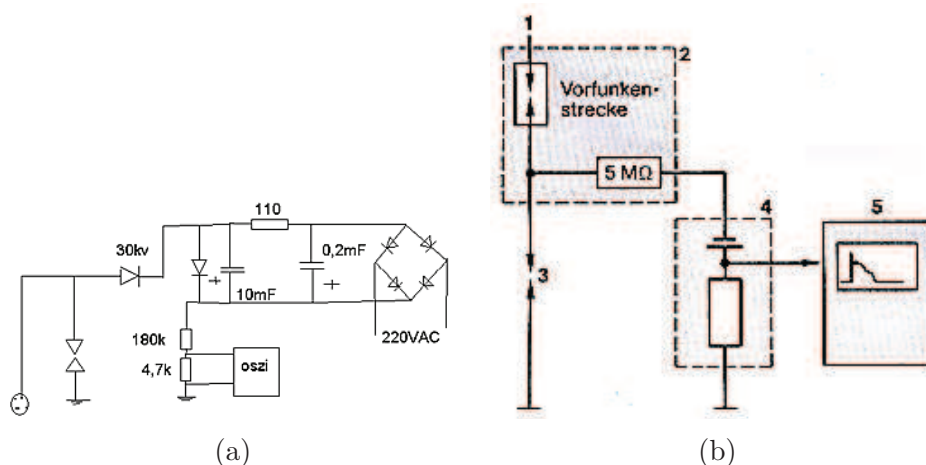
b) Schéma elektrického zapojení zařízení k měření ionizačního proudu. Zdroj napětí 280V. Průběh ionizačního proudu se získá prostřednictvím napětového signálu z odporu 4,7k $\Omega$ . Převzato z [23].



Obrázek 7.2:

a) Schéma elektrického zapojení zařízení k měření ionizačního proudu. Zdroj napětí 400V. Průběh ionizačního proudu se získá prostřednictvím napětového signálu z odporu R1. Převzato z [23].

b) Schéma elektrického zapojení zařízení k měření ionizačního proudu. Zdroj napětí 400V. Průběh ionizačního proudu se získá prostřednictvím napětového signálu z odporu. Převzato z [51].



Obrázek 7.3:

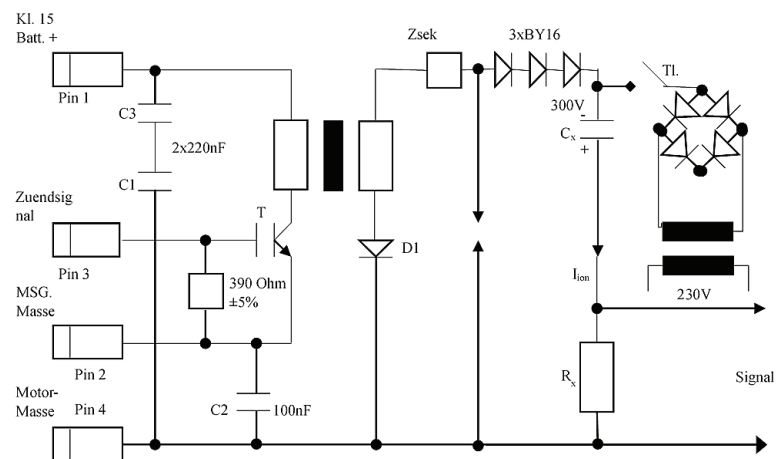
a) Schéma elektrického zapojení zařízení k měření ionizačního proudu. Zdroj napětí cca 300V. Průběh ionizačního proudu se získá prostřednictvím napěťového signálu z odporu 4,7kΩ. Převzato z [23].

b) Schéma elektrického zapojení zařízení k měření ionizačního proudu s jiskřištěm předřazeným zapalovací svíčky. Převzato z [7].

### Návrh zařízení k měření ionizačního proudu mezi elektrodami zapalovací svíčky

Na základě poznatků z odborné literatury je navrženo zařízení pro měření ionizačního proudu mezi elektrodami zapalovací svíčky. Zařízení musí umožnit měření ionizačního proudu procházejícího mezi elektrodami zapalovací svíčky v libovolném časovém úseku průběhu pracovního oběhu motoru, tzn. i v době přeskoku elektrické jiskry. Zařízení musí být použitelné zejména pro motory vybavené zapalovacím systémem se samostatnými jednojiskrovými cívkami přiřazenými k jednotlivým válcům motoru. Technická dokumentace „zapalovacích cívek“ 03D905115C používaných mj. u motorů koncernu VW je v příloze A.5.

Navrženo bylo uspořádání, jehož schéma je na obrázku 7.4. Hodnoty odporu  $R_X$  a kapacity kondenzátoru  $C_X$  je nutné stanovit při funkčních zkouškách navrhovaného zařízení. Při měření je na elektrody zapalovací svíčky připojen zdroj napětí přibližně 300V s opačnou polaritou, než je polarita vysokého napětí ze sekundárního vinutí jednojiskrové zapalovací cívky. Z odporu  $R_X$  se odebírá napěťový signál odpovídající ionizačnímu proudu. Napěťový signál a signál ze snímače polohy klikového hřídele motoru se přivádí do měřicího modulu indikační aparatury (viz. kapitola 3.2) a dále do počítače.



Obrázek 7.4: Schéma zapojení elektrického obvodu k měření průběhu ionizačního proudu  $I_{ion}$  připojeného k jednojiskrové zapalovací cívce 03D 9005 115 B.

## Literatura

- [1] ACIS - Advanced Corona Ignition System. *FEDERAL-MOGUL POWERTRAIN* [online]. Michigan: FEDERAL-MOGUL POWERTRAIN, 2017 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.federalmogul.com/en-US/OE/markets/Pages/Product-Details.aspx?ApplicationId=47&CategoryId=2&ProductId=224>
- [2] ATTARD, William P., Elisa TOULSON, Andrew HUISJEN, Xuefei CHEN, Guoming ZHU a Harold SCHOCK. *Spark Ignition and Pre-Chamber Turbulent Jet Ignition Combustion Visualization*. In: . s. -. DOI: 10.4271/2012-01-0823. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2012-01-0823/>
- [3] ATTARD, William. *Turbulent Jet Ignition Pre-chamber Combustion System for Spark Ignition Engines* [online]. Vynálezce: William Attard. 01. 11. 2011. US20120103302 A1. Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US20120103302>
- [4] BEROUN, Stanislav. *Termodynamika pracovního oběhu PSM, spalovací proces v PSM*. Technická univerzita v Liberci, 2009.
- [5] BEROUN, Stanislav. *Základy teorie hoření, mechanismus spalovacího procesu v pístových spalovacích motorech*. Technická univerzita v Liberci, 1998.
- [6] BLAŽEK, Josef. *Výzkum a vývoj komůrkového zážehu pro vozidlový motor*. Liberec, 2008. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce doc. Ing. Lubomír Moc, CSc.
- [7] BOSCH, Robert, GmbH. *Zündkerzen*. Stuttgart, 1985.
- [8] DE CASTRO RADICCHI, Fábio, Raphael Meireles BRAGA, Raniro DE OLIVEIRA ALVARENGA COELHO, Roberto Berlini Rodrigues DA COSTA a Ramón Molina VALLE. *Numerical Analysis of the Fluid Flow in a Prechamber for a Spark-ignition Engine*. In: . s. -. DOI: 10.4271/2015-36-0289. Dostupné také z: <http://papers.sae.org/2015-36-0289/>
- [9] Decline in diesel car sales offset by more demand for petrol; implications for climate targets. *ACEA - European Automobile Manufacturers Association* [online]. Brusel: ACEA, 2017 [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: <http://www.acea.be/press-releases/article/decline-in-diesel-car-sales-offset-by-more-demand-for-petrol-implications-f>

- [10] Dieselgate. *Wikipedia otevřená encyklopedie* [online]. United States California San Francisco: Wikipedia, 2017 [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dieselgate>
- [11] *Engine Technology International: Ray of light*. 2011, 2011(September). ISSN 1460-9509.
- [12] *Engine Technology International*. 2017, **2017**(January). ISSN 1460-9509.
- [13] EU CO<sub>2</sub> EMISSION STANDARDS FOR PASSENGER CARS AND LIGHT-COMMERCIAL VEHICLES. In: *The international council on clean transportation* [online]. Berlin: THEICCT, 2014 [cit. 2017-10-05]. Dostupné z: [http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate\\_EU-95gram\\_jan2014.pdf](http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_EU-95gram_jan2014.pdf)
- [14] GOLLIN, Walter, Erich BREUSER, Klaus LERCHENMÜLLER, Markus WEIMERT, Tim SKOWRONEK a Karl-Heinz VOCKE. *Ignition Systems for Gasoline Engines*. Plochingen, 2003.
- [15] GSCHEIDLE, Rolf. *Tabulky pro automechaniky: tabulky, vztahy, přehledy, normalizované postupy : matematika, vedení podniku, základní odborné znalosti, materiály, technické kreslení, odborné znalosti, elektrické vybavení, předpisy*. Praha: Europa-Sobotáles, 2009. ISBN 978-808-6706-214.
- [16] HAVEL, Jan. *Zapalovací systémy pro zážehové spalovací motory*. Liberec, 2016. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Josef Laurin.
- [17] HERNING, G., R: Combustion Analysis using Ionization Current. Dostupné na: <http://www.herningg.com/singh/Ionization%20current%20analysis.pdf>
- [18] HEYNE, S., M. MEIER, B. IMBERT a D. FAVRAT. Experimental investigation of prechamber autoignition in a natural gas engine for cogeneration. In: *Fuel*. 2009, **88**(3), s. 547-552. DOI: 10.1016/j.fuel.2008.09.032. ISSN 00162361. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016236108003712>
- [19] HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, c1988. ISBN 00-702-8637-X.
- [20] High-frequency Ignition System Based on Corona Discharge. *BorgWarner* [online]. Anderson USA: BorgWarner, 2014 [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: [https://www.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/2014\\_whitepaper\\_high-frequency-ignition-system-based-on-corona-discharge\\_en.pdf?sfvrsn=8](https://www.borgwarner.com/docs/default-source/default-document-library/2014_whitepaper_high-frequency-ignition-system-based-on-corona-discharge_en.pdf?sfvrsn=8)
- [21] HRDLIČKA, Martin. SNIŽOVÁNÍ EMISÍ OSOBNÍHO AUTOMOBILU A LEGISLATIVA. In: *International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, s. 92-102. ISBN 978-807-4943-546.

- [22] HVĚZDA, Jiří, Zbyněk SYROVÁTKA, Michal TAKÁTS a Jiří VÁVRA. EVALUATION OF IGNITION PRE-CHAMBER GEOMETRY BY MULTI-ZONE MODEL OF COMBUSTION. In: *International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, s. 12-22. ISBN 978-807-4943-546.
- [23] Ion sensing tests. !li! www.MoLIa.OrG Da PIAcE tO bE !li! digimods mods digi tuning [online]. Dostupné z: <http://www.molla.org/ISP/Draft1/>
- [24] JAMROZIK, Arkadiusz, Wojciech TUTAK, Arkadiusz KOCISZEWSKI, Marcin SOSNOWSKI, Numerical simulation of two-stage combustion in SI engine with prechamber, In *Applied Mathematical Modelling*, Volume 37, Issue 5, 2013, Pages 2961-2982, ISSN 0307-904X, <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.07.040>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X12004520>)
- [25] KUBEŠ, Pavel. *Impulsní silnoproudé výboje a jejich diagnostika*. KF FEL ČVUT 2004, [http://www.aldebaran.cz/plazma\\_p/files/00076\\_silnoproude.pdf2](http://www.aldebaran.cz/plazma_p/files/00076_silnoproude.pdf2)
- [26] MAHLE Jet Ignition. *MAHLE Powertrain* [online]. United Kingdom: MAHLE Powertrain, 2017 [cit. 2017-04-07]. Dostupné z: <http://www.mahle-powertrain.com/en/experience/mahle-jet-ignition/>
- [27] *Mahle motorsport* [online]. Stuttgart: Mahle, 2016 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://www.motorsport.mahle.com/motorsport/en/formular-1/>
- [28] MIKULANIN, Lukáš. *Zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou: SPARK PLUG WITH INTEGRATED COMBUSTION CHAMBER* [CD-ROM]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014.
- [29] MWM GmbH. *Spark Plug* [online]. Vynálezci: Olaf Berger, Friedrich Schäfer. 25. 07. 2012. EP 2 690 726 A1. Dostupné z: <http://www.freepatentsonline.com/EP2690726.pdf>
- [30] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 443/2009. *EUR-Lex* [online]. Brusel: EUR-Lex, 2009 [cit. 2015-10-05]. Dostupné z: <http://data.europa.eu/eli/reg/2009/443/oj>
- [31] *New registrations of passenger cars by type of motor energy and engine size*. Eurostat [online]. European Union: European Commission, 2017 [cit. 2017-05-01]. Dostupné z: [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road\\_eqr\\_carmot&lang=en](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=road_eqr_carmot&lang=en)
- [32] OPOČENSKÝ, Martin. *Zapalovací systémy zážehových spalovacích motorů*. Liberec, 2016. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Josef Laurin.



- [33] PÁV, Karel. *Measurement of ignition delay*. In: MECCA: Journal of Middle European Construction and Design of Cars. 01. Praha: ČVUT v Praze, 2010, s. 37-42. ISSN 1214-0821.
- [34] PUHL, Martin. *Corona and Laser Ignition in Internal Combustion Engines: A comparison to conventional spark plug ignition*. Technische universität Wien, 2007. Diplomová práce. Technische universität Wien. Vedoucí práce Ernst Wintner.
- [35] ROETHLISBERGER, R.P. a D. FAVRAT. Comparison between direct and indirect (prechamber) spark ignition in the case of a cogeneration natural gas engine, part I: engine geometrical parameters. *Applied Thermal Engineering*. 2002, **22**(11), 1217-1229. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00040-6. ISSN 13594311. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431102000406>
- [36] ROETHLISBERGER, R.P. a D. FAVRAT. Comparison between direct and indirect (prechamber) spark ignition in the case of a cogeneration natural gas engine. In: *Applied Thermal Engineering*. 2002, **22**(11), s. 1231-1243. DOI: 10.1016/S1359-4311(02)00041-8. ISSN 13594311. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431102000418>
- [37] SHAH, Ashish. *Improving the Efficiency of Gas Engines using Pre-chamber Ignition*. Lund, Sweden, 2015. Disertační práce. Lund University.
- [38] SRIVSTAVA, Dhananjay Kumar, Avinash Kumar AGARWAL. Comparative experimental evaluation of performance, combustion and emissions of laser ignition with conventional spark plug in a compressed natural gas fuelled single cylinder engine, In *Fuel*, Volume 123, 2014, Pages 113-122, ISSN 0016-2361, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.01.046>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236114000568>)
- [39] SZWAJA, Stanislaw, Arkadiusz JAMROZIK, Wojciech TUTAK. A two-stage combustion system for burning lean gasoline mixtures in a stationary spark ignited engine, In *Applied Energy*, Volume 105, 2013, Pages 271-281, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.080>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191300007X>)
- [40] TAKASHIMA, Yoshitane, Satoshi KATAYAMA, Takahiro SAKO, Masahiro FURUTANI. Activities for high-efficiency small gas engines, In *Applied Thermal Engineering*, Volume 114, 2017, Pages 1372-1377, ISSN 1359-4311, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.166>. (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116327685>)
- [41] The Development of a Pre-Chamber Combustion System for Lean Combustion of Liquid and Gaseous Fuels. *Coordinating Research Council* [online]. USA, Georgia: CRC, 2014 [cit. 2016-10-07]. Dostupné z:



<https://crcao.org/workshops/2014AFEE/Final%20Presentations/Day%202%20Session%204%20Blaxill,%20Hugh/4-4%20Blaxill,%20Hugh%20%20CRC%202014%20Lean%20Combustion%20of%20Liquid%20and%20Gaseous%20Fuels.pdf>

- [42] TOZZI, Liuggi, SALTER, Douglas. *Pre-chamber spark plug* [online]. Vynálezce: Liuggi Tozzi, Douglas Salter. 07. 06. 2005. US 20070069617 A1. Dostupné z: <https://www.google.ch/patents/US20070069617>
- [43] TSUNEKANE, Masaki, Takayuki INOHARA, Kenji KANEHARA a Takunori TAIR. Micro-Solid-State Laser for Ignition of Automobile Engines. In: *Advances in Solid State Lasers Development and Applications*. InTech, 2010. DOI: 10.5772/7949. ISBN 978-953-7619-80-0. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/advances-in-solid-state-lasers-development-and-applications/micro-solid-state-laser-for-ignition-of-automobile-engines>
- [44] VARTIOVAARA,V.: DIY ion sensing ignitron subsystem. Dostupné na: <http://www.aces.edu/parmega/efi/temp/DIY-Ion-Sensing.pdf>
- [45] Vizualizace dějů uvnitř spalovacího motoru. *Katedra vozidel a motorů* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2012 [cit. 2015-06-09]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:2134>
- [46] VOJNOV, A., N.: *Processy sgoranija v bystrochodnych poršněvych dvigatěljach*. Mašinostrojenije, Moskva, 1965
- [47] Vše o zapalovacích svíčkách. Federal-Mogul [online]. Belgium: Federal-Mogul, 2016 [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: [http://beru.federalmogul.com/sites/default/files/brochure/file/beru\\_ti02\\_all\\_about\\_spark\\_cz\\_lores.pdf](http://beru.federalmogul.com/sites/default/files/brochure/file/beru_ti02_all_about_spark_cz_lores.pdf)
- [48] Welcome to BERU, the leading specialist in OE-quality ignition and diesel cold-start technology | Federal-Mogul Global Aftermarket [online]. Copyright © [cit. 12.12.2017]. Dostupné z: [http://beru.federalmogul.com/sites/default/files/ti07\\_ignition\\_coils\\_cz\\_2014.pdf](http://beru.federalmogul.com/sites/default/files/ti07_ignition_coils_cz_2014.pdf)
- [49] Zapalovací svíčky: Technický manuál. *Brisk* [online]. Tábor: Brisk, 2015 [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: [http://www.brisk.cz/content/uploads/2015/08/technical\\_manual\\_cz\\_150dpi.pdf](http://www.brisk.cz/content/uploads/2015/08/technical_manual_cz_150dpi.pdf)
- [50] *Zapalování*. Praha: Robert Bosch, 1999. Technická příručka. ISBN 80-902-5855-7.
- [51] ZHONGQUAN Gao, Xiaomin Wu, Hui Gao, Bing Liu, Jie Wang, Xiangwen Meng and Zuohua Huang: Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas–hydrogen blends with BSS de-noising method. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 23, December 2010, Pages 12918-12929

## Seznam publikací autora souvisejících s řešenou problematikou

- [A.1] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH a Lukáš MIKULANIN. Temperature field of spark plug in the SI engine. 20th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2014. ISBN 978-80-214-4871-1, ISBN 1805-8248
- [A.2] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH a Lukáš MIKULANIN. Optimisation of Spark Plug with integrated Chamber. XLV. International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines. ISBN 978-80-7375-801-1
- [A.3] DITTRICH, Aleš. Measuring the ionization current in the cylinder petrol engine. Workshop for Ph.D. students of Faculty of textile engineering and Faculty of mechanical engineering TUL. ISBN 978-80-7494-100-9
- [A.4] DITTRICH, Aleš, Stanislav BEROUN, Pavel BRABEC a Lukáš MIKULANIN. Spark plug with integrated chamber. 5th International Conference on Mechanics, Simulation and Control.
- [A.5] DITTRICH, Aleš, Josef LAURIN a Tomáš ZVOLSKÝ. Device for detecting the level of ionization of the fuel mixture in the cylinder petrol engine. 5th International Conference on Mechanics, Simulation and Control.
- [A.6] DITTRICH, Aleš. Měření teplot v obtížně přístupných místech v hlavě válců motoru. Studentská vědecká a odborná činnost 2012 ISBN 978-80-7372-857-1
- [A.7] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH, Lukáš MIKULANIN a Karel PÁV. Ignition of the homogenous mixture in the engine cylinder by spark plug with integrated chamber. XLVI. International Scientific Conference of the Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Research of Internal Combustion Engines. ISBN 978-80-227-4424-9
- [A.8] BEROUN, Stanislav, Karel PÁV, Aleš DITTRICH a Lukáš MIKULANIN. Optimization research programme for spark plug with integrated chamber. XLVI. International Scientific Conference of the Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Research of Internal Combustion Engines. ISBN 978-80-227-4424-9

## Seznam ostatních publikací autora

- [B.1] DITTRICH, Aleš a Martin HOŠEK. Solid particles in the exhaust gases in SI engine. International doctoral seminar, Smolenice castle. ISBN 978-80-8096-145-9.
- [B.2] DITTRICH, Aleš. Industrial engine operated by vegetable oil. International doctoral seminar, Smolenice castle. ISBN 978-80-8096-145-9.
- [B.3] DITTRICH, Aleš, Martin HOŠEK a Ondřej DRÁB. The injection of liquid LPG. International doctoral seminar, Smolenice castle. ISBN 978-80-8096-145-9.
- [B.4] VOJTÍŠEK-LOM, Michal, Aleš DITTRICH a Vít DITTRICH. On-board Monitoring of Small Engine Emissions. ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, ETH Zentrum, Zurich, Switzerland. ISBN 978-3-033-03027-5
- [B.5] VOJTÍŠEK-LOM, Michal, Jan TOPINKA, Aleš DITTRICH, Michael FENKL, Martin MAZAČ a Martin PECHOUT. Real-world Exhaust Emissions in Congested Urban Areas. ETH-Conference on Combustion Generated Nanoparticles, ETH Zentrum, Zurich, Switzerland. ISBN 978-3-033-03027-5
- [B.6] DITTRICH, Aleš a Stanislav BEROUN. Properties of diesel engine operated by mixed fuel (diesel + petrol). XLII. International scientific conference KOKA 2011. ISSN 1337-8996.
- [B.7] DITTRICH, Aleš, Stanislav BEROUN a Martin HOŠEK. Pressure in nozzle canal for injection of liquid LPG. XLII. International scientific conference KOKA 2011. ISSN 1337-8996.
- [B.8] VOJTÍŠEK-LOM, Michal, Aleš DITTRICH, Martin MAZAČ, Martin DUFEK a Michael FENKL. On-road particulate matter emissions from homogeneous charge spark ignition engines. XLII. International scientific conference KOKA 2011. ISSN 1337-8996.
- [B.9] VOJTÍŠEK-LOM, Michal, Martin PECHOUT, Martin MAZAČ, Aleš DITTRICH a Milan ČIHÁK. Particulate matter measurement with an improvised full-flow dilution tunnel. XLII. International scientific conference KOKA 2011. ISSN 1337-8996.

- [B.10] DITTRICH, Aleš a Josef LAURIN. Průmyslový motor na rostlinný olej. Alternativní energie 4/2011 - časopis
- [B.11] DITTRICH, Aleš. Pevné částice ve výfukových plynech spalovacích motorů. Workshop pro doktorandy FS a FT TUL. ISBN 978-80-7372-765-9
- [B.12] DITTRICH, Aleš, Ondřej DRÁB a Josef LAURIN. Device for detecting burning mixture temperature in combustion engine, International doctoral seminar, Smolenice castle ISBN 978-80-8096-164-0
- [B.13] DRÁB, Ondřej, Aleš DITTRICH a Stanislav BEROUN. Fuel system to run on LPG liquid in a combustion engine, International doctoral seminar, Smolenice castle ISBN 978-80-8096-164-0
- [B.14] DITTRICH, Aleš. Měření teplot v obtížně přístupných místech v hlavě válců motoru. Studentská vědecká a odborná činnost 2012 ISBN 978-80-7372-857-1
- [B.15] DITTRICH, Aleš a Ondřej DRÁB. Temperature in Nozzle Canal for Injection of Liquid LPG. XLIII. International scientific conference KOKA 2012, Roztoky u Prahy, ISBN 978-80-86786-34-6
- [B.16] DRÁB, Ondřej a Aleš DITTRICH. Diagnosis of Assembly Defects of Combustion Engines. XLIII. International scientific conference KOKA 2012, Roztoky u Prahy, ISBN 978-80-86786-34-6
- [B.17] DITTRICH, Aleš. Vlastnosti vznětového motoru při provozu na směsné palivo. Workshop pro doktorandy FS a FT TUL, Rokytnice nad Jizerou, ISBN 978-80-7372-891-5
- [B.18] HUYNH LE HONG, Thai, Aleš DITTRICH a Ondřej DRÁB. Model Predict Vibration and Noise of Disc Brake. 3rd International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE 2012), Paris, France, ISBN 978-3-03785-514-0
- [B.19] DITTRICH, Aleš a Ondřej DRÁB. Pressure in the cylinder of piston compressor., FOI – Faculty of Organization and Informatics, University of Zagreb, Croatia 978-953-6071-40-1
- [B.20] DRÁB, Ondřej, Aleš DITTRICH a Stanislav BEROUN. Measurement of mechanical loss of combustion engines, FOI – Faculty of Organization and Informatics, University of Zagreb, Croatia 978-953-6071-40-1
- [B.21] DITTRICH, Aleš. Teploty na ventilových sedlech při provozu motoru na různá paliva. Studentská vědecká a odborná činnost 2013 ISBN 978-80-7372-969-1
- [B.22] DITTRICH, Aleš. Pevné částice ve výfukových plynech zážehového motoru. Workshop pro doktorandy FS a FT TUL, Rokytnice nad Jizerou, ISBN 978-80-7372-987-5

- [B.23] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH, Ondřej DRÁB a Thanh Tuan NGUYEN. Computational Modeling of the liquid LPG Injection into the suction Manifold of an SI Vehicle Engine. 4th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. July 20-21, Moscow, July 2013, ISSN 1660-9336
- [B.24] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH, Ondřej DRÁB a Thanh Tuan NGUYEN. Computational Modeling of the liquid LPG Injection into the suction Manifold of an SI Vehicle Engine. In: Journal Applied Mechanics and Materials Vols. 390 (2013),pp 355-359, ISSN 1660-9336, Trans Tech Publications, Switzerland, <http://www.scientific.net/AMM.390.355>, 2013. (ISBN print: 978-3-03785-833-2; doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.390.355; www.ttp.net. ID: 147.230.104.213-01/08/13,09:43:55)
- [B.25] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH a Thanh Tuan NGUYEN. Injektor of liquid LPG. 20th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2014. ISBN 978-80-214-4871-1, ISBN 1805-8248
- [B.26] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH a Lukáš MIKULANIN. Temperature field of spark plug in the SI engine. 20th International Conference ENGINEERING MECHANICS 2014. ISBN 978-80-214-4871-1, ISBN 1805-8248
- [B.27] DITTRICH, Aleš. Temperature measurement in hard to reach places in the cylinder head International doctoral seminar 2014. ISBN 978-80-8096-195-4
- [B.28] BRABEC, Pavel a Aleš DITTRICH. The Simulation Calculation of Temperatures on Valve Seats of Combustion Engine and its Verification. 5th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering. ISSN 1662-8985
- [B.29] BRABEC, Pavel a Aleš DITTRICH. The Simulation Calculation of Temperatures on Valve Seats of Combustion Engine and its Verification. Advanced Materials Research, vol. 1016, 2014, p. 577-581. ISSN 1662-8985. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1016.577
- [B.30] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC a Aleš DITTRICH. The new design of the end part of injector of liquid LPG. XLV. International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines. ISBN 978-80-7375-801-1
- [B.31] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH a Lukáš MIKULANIN. Optimisation of Spark Plug with integrated Chamber. XLV. International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines. ISBN 978-80-7375-801-1

- [B.32] DITTRICH, Aleš. Measuring the ionization current in the cylinder petrol engine. Workshop for Ph.D. students of Faculty of textile engineering and Faculty of mechanical engineering TUL. ISBN 978-80-7494-100-9
- [B.33] PECHOUT, Martin, Aleš DITTRICH a Michal VOJTÍŠEK. Operation of an Ordinary PFI Engine on n-butanol and Iso-butanol and Their Blends with Gasoline, SAE 2014. ISSN 0148-7191
- [B.34] LAURIN, Josef a Aleš DITTRICH. Present and future of gas automotive fuels in the Czech Republic. 41. Mezinárodní konference kateder dopravních, manipulačních, stavebních a zemědělských strojů. ISBN 978-80-7494-196-2
- [B.35] DITTRICH, Aleš, Stanislav BEROUN, Pavel BRABEC a Lukáš MIKULANIN. Spark plug with integrated chamber. The 5th International Conference on Mechanics, Simulation and Control (ICMSC 2015). ISSN 1662-8985
- [B.36] DITTRICH, Aleš, Josef LAURIN a Tomáš ZVOLSKÝ. Device for detecting the level of ionization of the fuel mixture in the cylinder petrol engine. The 5th International Conference on Mechanics, Simulation and Control (ICMSC 2015). ISSN 1662-8985
- [B.37] PIRJOLA, Liisa, Aleš DITTRICH, Jarkko V. NIEMI, Sanna SAARIKOSKI, Aleksi MALINEN, Heino KUULUVAINEN, Hugo WIHESAARI, Hilka TIMONEN, Anu KOUSA, Topi RÖNKKÖ a Risto HILLAMO. Effects of vehicle technology on real exhaust particle emissions from city buses. Aerosol Technology 2015 (AT2015).
- [B.38] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH, Lukáš MIKULANIN a Karel PÁV. Ignition of the homogenous mixture in the engine cylinder by spark plug with integrated chamber. XLVI. International Scientific Conference of the Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Research of Internal Combustion Engines. ISBN 978-80-227-4424-9
- [B.39] BEROUN, Stanislav, Karel PÁV, Aleš DITTRICH a Lukáš MIKULANIN. Optimization research programme for spark plug with integrated chamber. XLVI. International Scientific Conference of the Czech and Slovak Universities and Institutions Dealing with Research of Internal Combustion Engines. ISBN 978-80-227-4424-9
- [B.40] BEROUN, Stanislav aj. Ignition of the Homogenous Mixture in the Engine Cylinder by Spark Plug with Integrated Chamber. XLVI. International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines. 1. vyd. Bratislava, Slovak Republic: Slovak University of Technology in Bratislava, Institute of Transport Technology and Designing, Department of Cars, Ships and Combustion Engines, 2015. S. 67 – 74. ISBN 978-80-227-4424-9.



- [B.41] DITTRICH, Aleš, Josef LAURIN a Tomáš ZVOLSKÝ. Device for Detecting the Level of Ionization of the Fuel Mixture in the Cylinder Petrol Engine. Applied Mechanics and Materials (Volumes 799-800); Main Theme: Mechanical and Electrical Technology VII; Chapter 6. Motor Systems and Vehicle Engineering. 1. vyd. Bali, Indonesia: Trans Tech Publications, Switzerland, 2015. S. 880 – 884. ISBN 978-3-03835-631-8.
- [B.42] BRABEC, Pavel, Aleš DITTRICH a Stanislav BEROUN. Vehicle SI Engine with MPI of Liquid State LPG. MECCA. 1. vyd. Prague: Czech Technical University in Prague, 2016, roč. XIV, č. 1. S. 41 – 47. ISSN 1214-0821.
- [B.43] PIRJOLA, Liisa, Aleš DITTRICH aj. Physical and Chemical Characterization of Real-World Particle Number and Mass Emissions from City Buses in Finland. Environmental Science and Technology. 1. vyd. 1155 Sixteenth Street, NW, Washington, DC 20036: American Chemical Society, 2016, roč. 50, č. 1. S. 294 – 304. ISSN 0013-936X.
- [B.44] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC a Aleš DITTRICH. Structure of the injector for MPi of liquid state LPG and the process of injection. XLVII. International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines. 0. vyd. Brno: Brno University of Technology, Faculty of mechanical engineering Institute of automotive engineering, 2016. S. 21 – 30. ISBN 978-80-214-5379-1.
- [B.45] DITTRICH, Aleš, Pavel BRABEC a Stanislav BEROUN. Injection of liquid LPG thermodynamics. 22th International Conference Engineering mechanics 2016. 1. vyd. Prague: Institute of Termomechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, 2016. S. 62 – 65. ISBN 978-80-87012-59-8, ISSN 1805-8248.
- [B.46] DITTRICH, Aleš a Stanislav BEROUN. Effect of temperature on valve seats when operating on alternative fuels. In: Mechanics and materials in design. Portugalsko: INEGI/FEUP, 2017, s. 365-372. ISBN 978-989-98832-7-7.
- [B.47] SCHOLZ, Celestýn a Aleš DITTRICH. Fuel injection in engine suction duct in non-stationary modes. In: International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, s. 50-60. ISBN 978-807-4943-546.
- [B.48] VOŽENÍLEK, Robert, Stanislav BEROUN a Aleš DITTRICH . Měření pasivních odporů pístového motoru protáčením se zvyšováním tlaku ve válci. In: International Scientific Conference of the Czech and Slovak University Departments and Institutions Dealing with the Research of Internal Combustion Engines. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2017, s. 181-188. ISBN 978-807-4943-546.

## Seznam funkčních vzorků autora

- [C.1] BEROUN, Stanislav, Aleš DITTRICH a Ondřej DRÁB. 2011 "Speciální hlava spalovacího motoru pro identifikaci teplotního zatížení sedel ventilů".
- [C.2] LAURIN, Josef a Aleš DITTRICH. 2011 "Průmyslový spalovací motor na rostlinný olej".
- [C.3] BEROUN, Stanislav, Aleš DITTRICH a Ondřej DRÁB. 2011 "Vstřikovač kapalného LPG s ohřevem".
- [C.4] DITTRICH, Aleš a Josef LAURIN. 2012 "Zařízení ke zjišťování teplot hoření směsi v pístových spalovacích motorech".
- [C.5] DITTRICH, Aleš a Ondřej DRÁB. 2012 "Maketa kompresoru pro stanovení termodynamických dějů".
- [C.6] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Lubomír MOC, Aleš DITTRICH, Ondřej DRÁB, Josef POPELKA a Petr STARÝ. 2013 "Vstřikovač kapalného LPG s elektrickým ohřevem - varianta s odporovým drátem".
- [C.7] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Lubomír MOC, Aleš DITTRICH, Ondřej DRÁB, Josef POPELKA a Petr STARÝ. 2013 "Vstřikovač kapalného LPG s elektrickým ohřevem - varianta s topným tělesem".
- [C.8] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH a Lukáš MIKULANIN. 2014 "Zapalovací svíčka s integrovanou zapalovací komůrkou".
- [C.9] BEROUN, Stanislav, Aleš DITTRICH a Lukáš MIKULANIN. 2014 "Zážehový motor se zapalovacími svíčkami s integrovanou komůrkou bez přívodu paliva".
- [C.10] DITTRICH, Aleš a Josef LAURIN. 2014 "Zařízení k měření ionizačního proudu ve válci zážehového motoru".
- [C.11] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC a Aleš DITTRICH. 2015 "Zážehový vozidlový motor EA111.03E-LPG s tvořením směsi vstřikováním kapalného LPG do sacího potrubí".
- [C.12] BEROUN, Stanislav, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH, Josef POPELKA a Tomáš ZVOLSKÝ. 2017 "Vozidlový plynový duální motor se vstřikováním kapalného LPG do sacího potrubí".

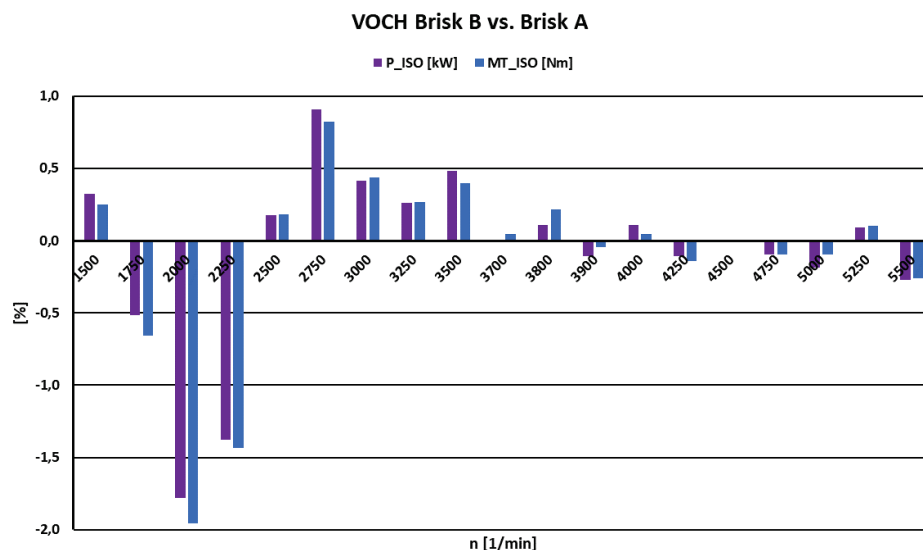


## Seznam užitečných vzorů a patentů autora

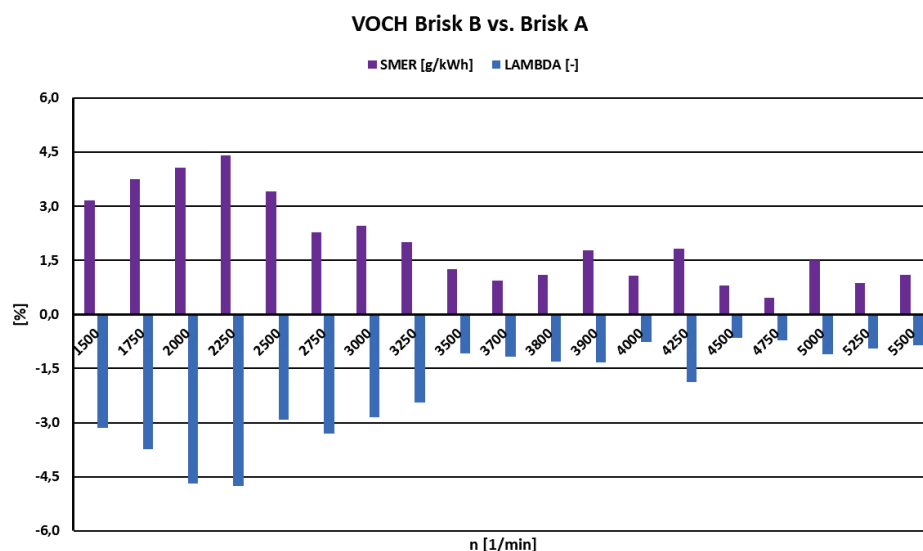
- [D.1] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Zařízení ke vstřikování tekutého plynu pro spalovací motor. Původci: Stanislav BEROUN, Aleš DITTRICH, Ondřej DRÁB, Martin HOŠEK. Česká republika. Užitečný vzor CZ 23313 U1. 9.12.2011.
- [D.2] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Zařízení ke vstřikování zkapalněného plynu do sacího potrubí zážehového spalovacího motoru s elektrickým odporovým ohřevem. Původci: Stanislav BEROUN, Aleš DITTRICH, Ondřej DRÁB, Pavel BRABEC. Česká republika. Užitečný vzor CZ 27068 U1. 27.3.2014.
- [D.3] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Zapalovací svíčka. Vynálezci: Stanislav BEROUN, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH, Zdeněk STACH. Česká republika. Patentový spis PV 2017-195. 6.4.2017.
- [D.4] TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Zařízení ke vstřikování kapalného LPG do sacího potrubí spalovacího motoru. Vynálezci: Stanislav BEROUN, Pavel BRABEC, Aleš DITTRICH, Tomáš ZVOLSKÝ. Česká republika. Patentový spis PV 2017-447. 3.8.2017.

## A Přílohy

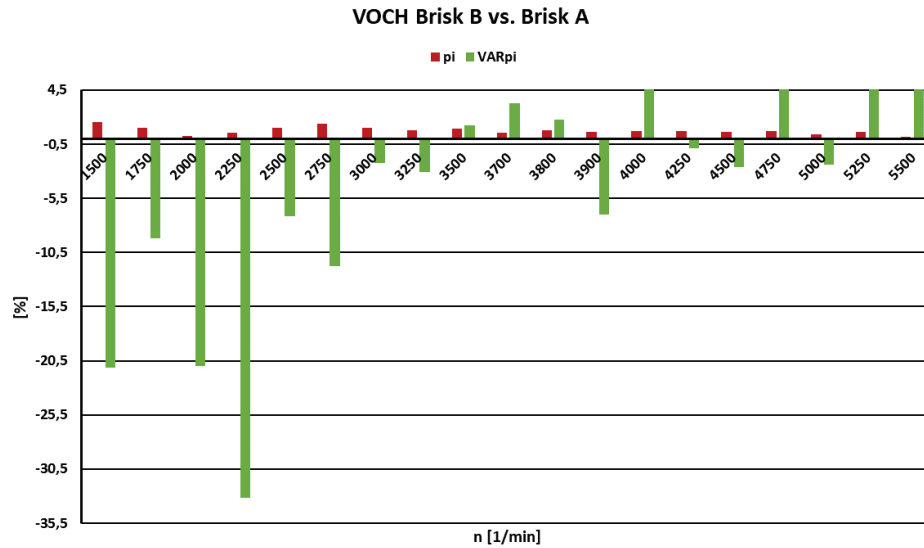
## A.1 Klasická zapalovací svíčka



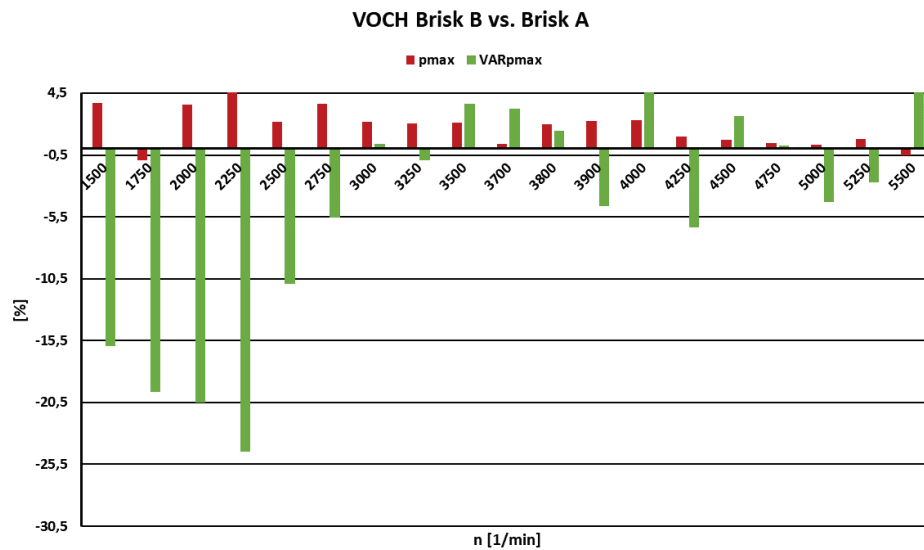
Obrázek A.1: Porovnání Brisk A a Brisk B - procentuální rozdíl P<sub>ISO</sub> a M<sub>t</sub><sub>ISO</sub> při VOCH - nulová základna je vztažena k hodnotám pro Brisk A - kladné hodnoty odpovídají vyšším hodnotám P<sub>ISO</sub> a M<sub>t</sub><sub>ISO</sub> při provozu s Brisk B a naopak.



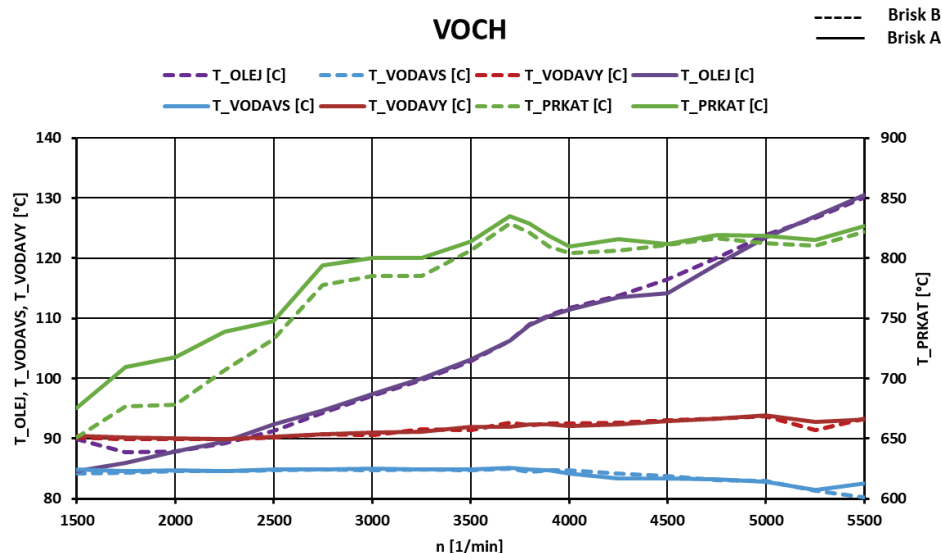
Obrázek A.2: Porovnání Brisk A a Brisk B - procentuální rozdíl měrné spotřeby SMER a součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  při VOCH - nulová základna je vztažena k hodnotám pro Brisk A - zvýšení měrné spotřeby při provozu motoru s Brisk B odpovídá snížení součinitele  $\lambda$  (vyšší bohatost palivovzdušné směsi).



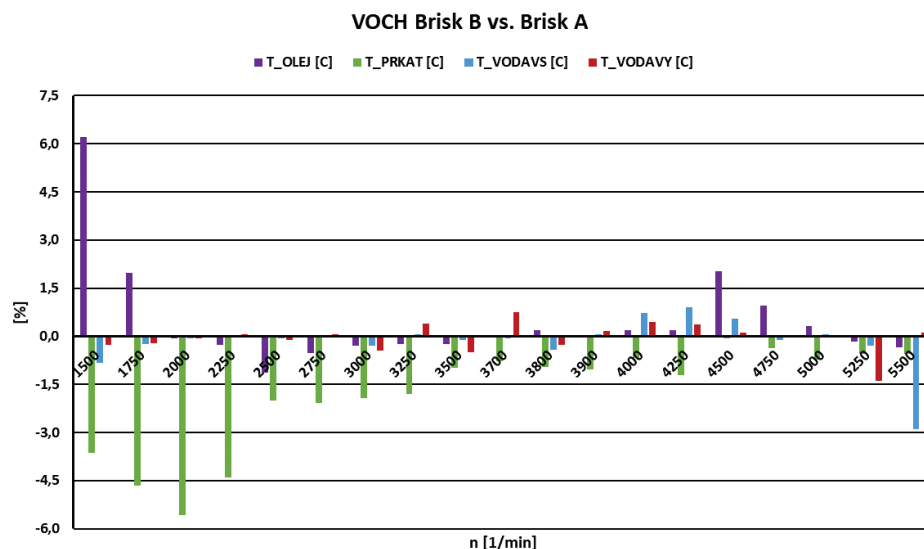
Obrázek A.3: Porovnání Brisk A a Brisk B - procentuální rozdíl středního indikovaného tlaku  $p_i$  a jeho variability  $VAR_{p_i}$  při VOCH - nulová základna je vztažena k hodnotám pro Brisk A. Při provozu motoru s Brisk B došlo v celém otáčkovém rozsahu k mírnému zvýšení  $p_i$  a snížení  $VAR_{p_i}$  zejména v oblasti do 3000 1/min.



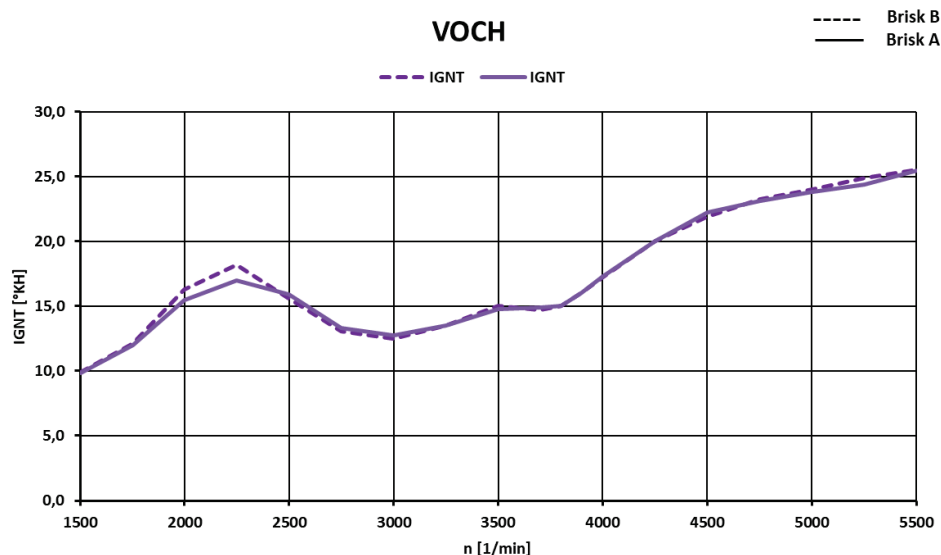
Obrázek A.4: Porovnání Brisk A a Brisk B - procentuální rozdíl maximálního tlaku  $p_{max}$  a jeho variability  $VAR_{p_{max}}$  při VOCH - nulová základna je vztažena k hodnotám pro Brisk A. Při provozu motoru s Brisk B došlo v téměř celém otáčkovém rozsahu ke zvýšení  $p_{max}$  a snížení  $VAR_{p_{max}}$  zejména v oblasti do 3000 1/min.



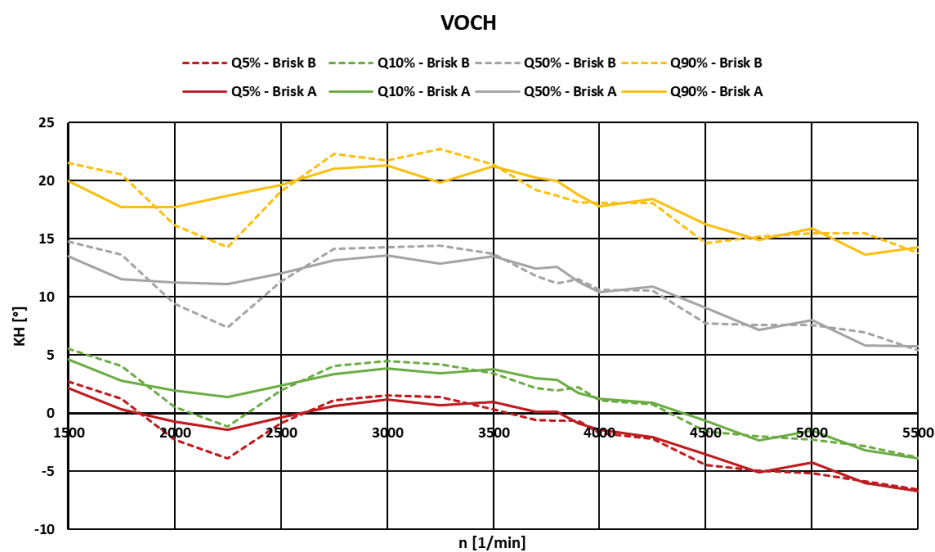
Obrázek A.5: Porovnání Brisk A a Brisk B - teploty provozních kapalin a výfukových plynů před katalyzátorem při VOCH. Nižší teploty výfukových plynů při provozu s Brisk B jsou způsobené snížením součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  - tedy zvýšením bohatosti palivovzdušné směsi, což má za následek snížení teploty výfukových plynů.



Obrázek A.6: Porovnání Brisk A a Brisk B - procentuální rozdíl teplot provozních kapalin a výfukových plynů při VOCH - nulová základna je vztahena k hodnotám pro Brisk A. Při provozu motoru s Brisk B byly provozní kapaliny udržovány na stejné úrovni s odchylkou cca 1% jako při provozu s Brisk A. Důvod snížení teploty výfukových plynů je uveden výše.



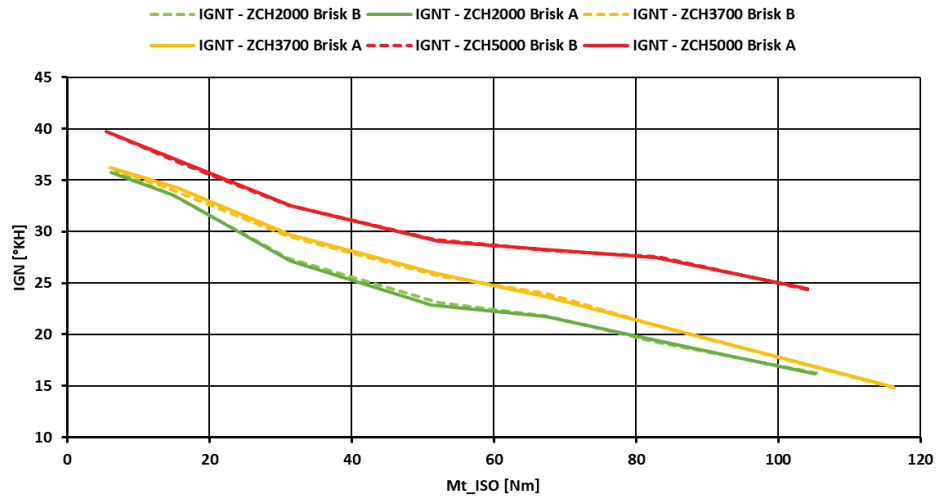
Obrázek A.7: Porovnání Brisk A a Brisk B - hodnoty předstihu zážehu při VOCH. Při provozu motoru s Brisk B došlo ke zvýšení předstihu zážehu v oblasti do 2500 1/min.



Obrázek A.8: Porovnání Brisk A a Brisk B - údaje o vyhoření náplně válce (Q5%, Q10%, Q50% a Q90%) při VOCH. Zrychlení vyhořívání náplně válce při provozu s Brisk B je v oblasti mezi 2000 1/min a 2500 1/min způsobené zvýšením předstihu zážehu (uvedeno výše).

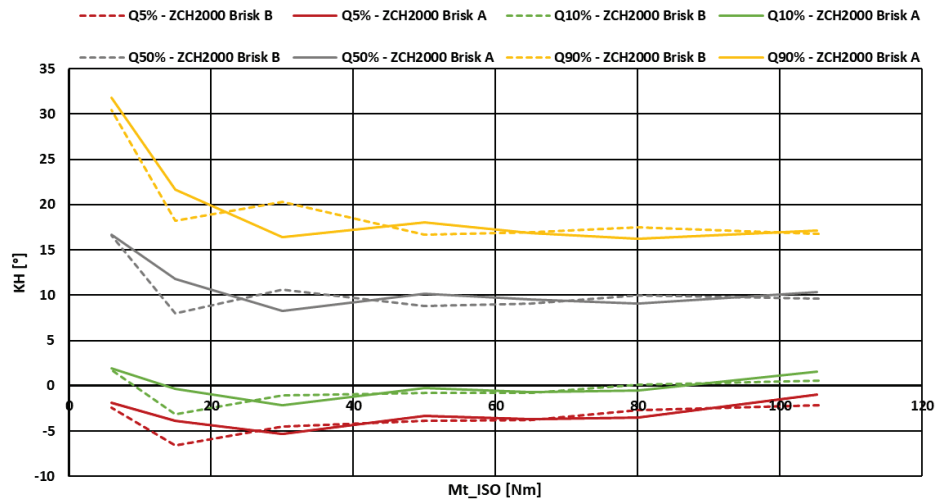


### ZCH2000, 3700, 5000

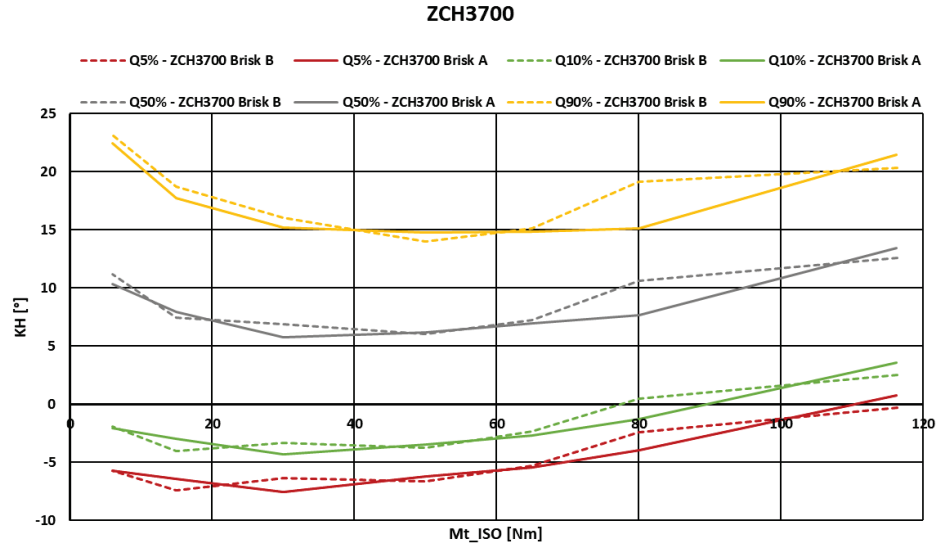


Obrázek A.9: Porovnání Brisk A a Brisk B - hodnoty předstihu zážehu při ZCH2000, ZCH3700 a ZCH5000. Hodnoty předstihů zážehu jsou v celé oblasti při provozu motoru s oběma typy ZS téměř shodné.

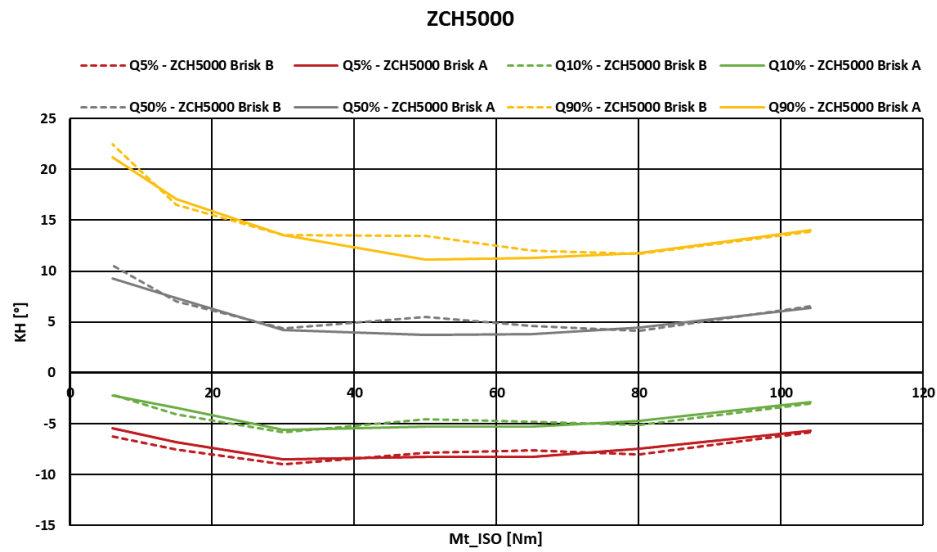
### ZCH2000



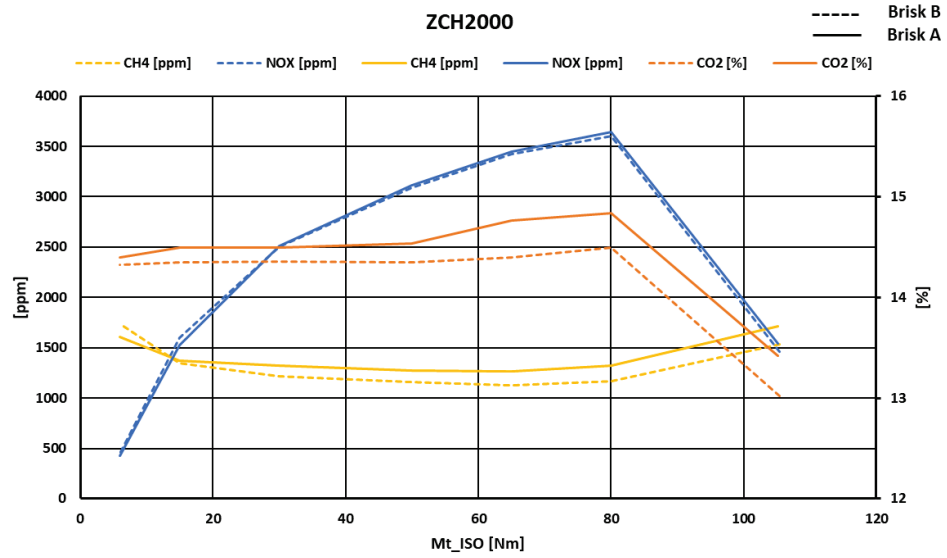
Obrázek A.10: Porovnání Brisk A a Brisk B - údaje o vyhoření náplně válce (Q5%, Q10%, Q50% a Q90%) při ZCH2000.



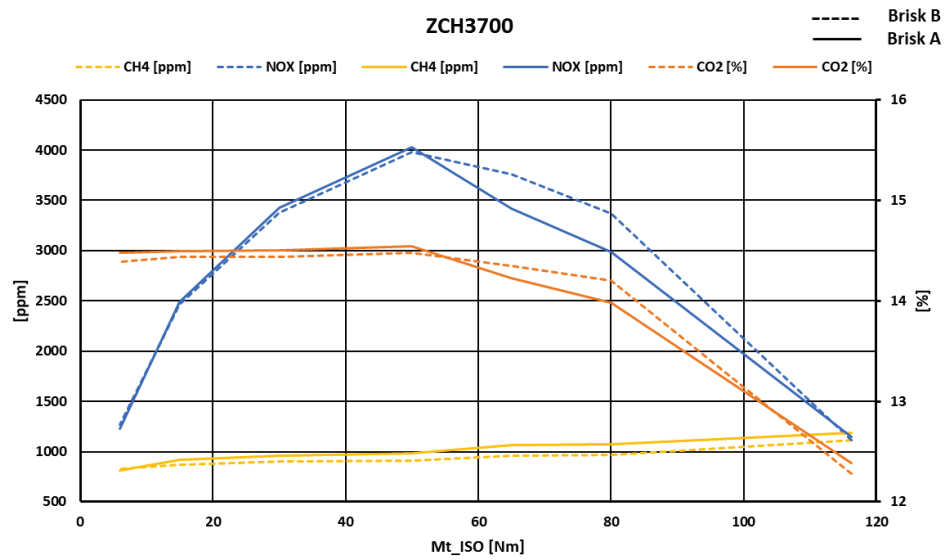
Obrázek A.11: Porovnání Brisk A a Brisk B - údaje o vyhoření náplně válce (Q5%, Q10%, Q50% a Q90%) při ZCH3700.



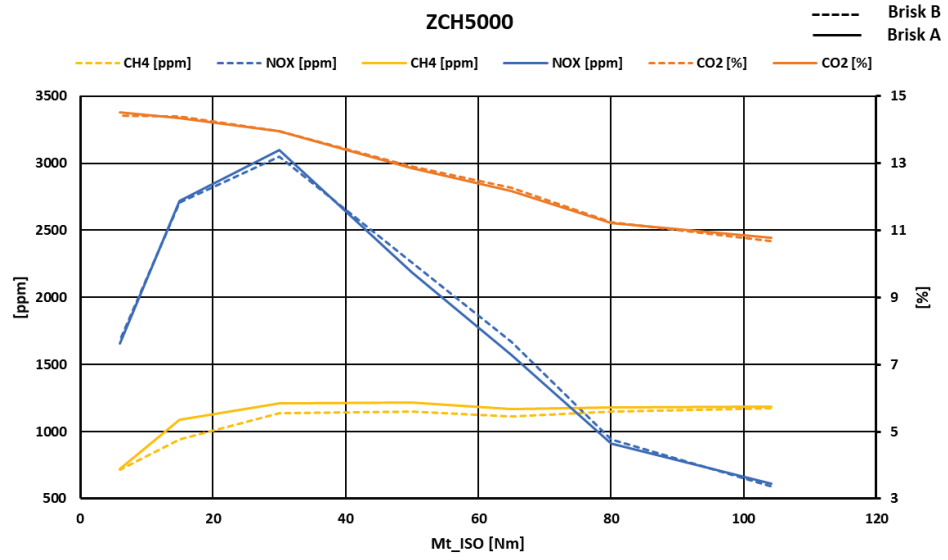
Obrázek A.12: Porovnání Brisk A a Brisk B - údaje o vyhoření náplně válce (Q5%, Q10%, Q50% a Q90%) při ZCH5000.



Obrázek A.13: Porovnání Brisk A a Brisk B - emisní vlastnosti motoru při ZCH2000.

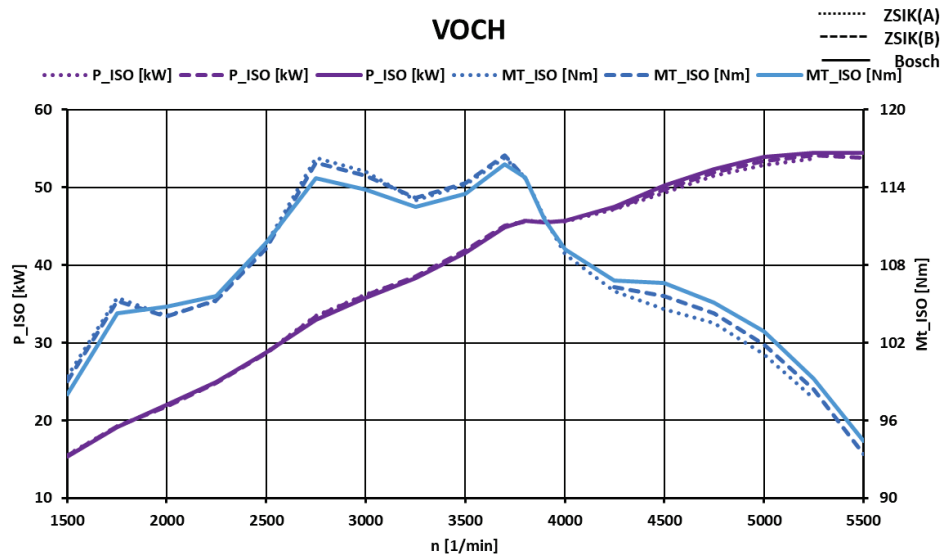


Obrázek A.14: Porovnání Brisk A a Brisk B - emisní vlastnosti motoru při ZCH3700.

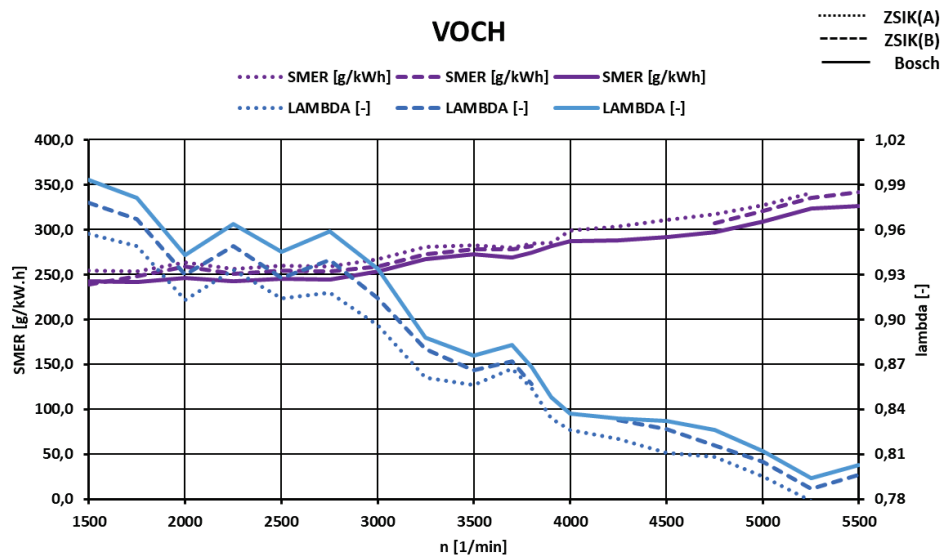


Obrázek A.15: Porovnání Brisk A a Brisk B - emisní vlastnosti motoru při ZCH5000.

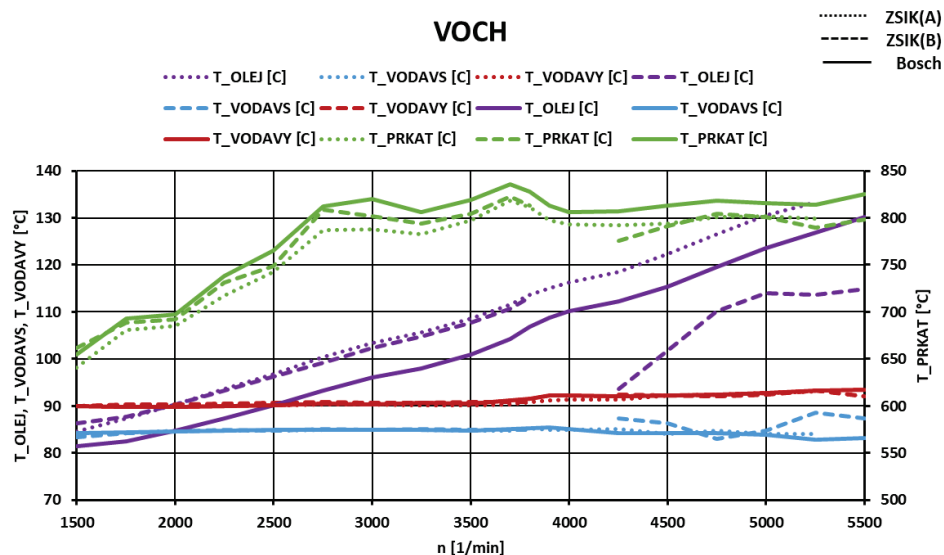
## A.2 ZSIK



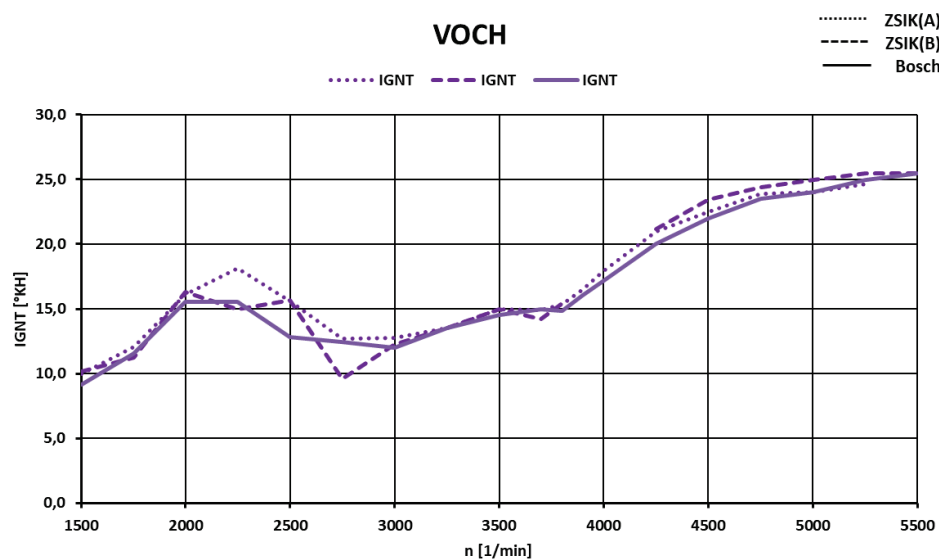
Obrázek A.16: Výkonové parametry motoru EA111 při provozu se ZSIK a ZS.



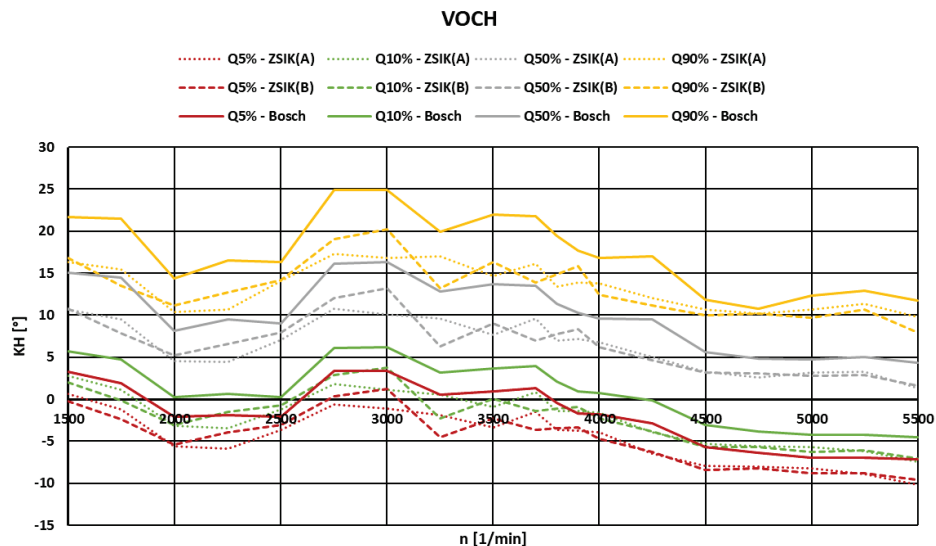
Obrázek A.17: Měrná spotřeba paliva a součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  při provozu motoru EA111 se ZSIK a ZS.



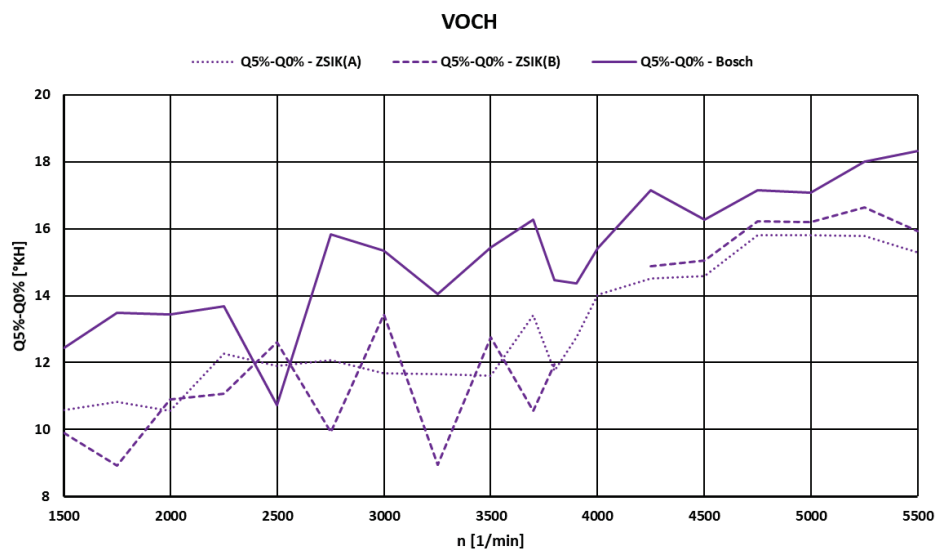
Obrázek A.18: Porovnání ZSIK a ZS - teploty provozních kapalin a výfukových plynů před katalyzátorem při VOCH. Nižší teploty výfukových plynů při provozu se ZSIK jsou způsobené snížením součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$  - tedy zvýšením bohatosti palivovzdušné směsi, což má za následek snížení teploty výfukových plynů.



Obrázek A.19: Hodnoty předstihu zážehu při VOCH při provozu motoru EA111 se ZS a ZSIK.

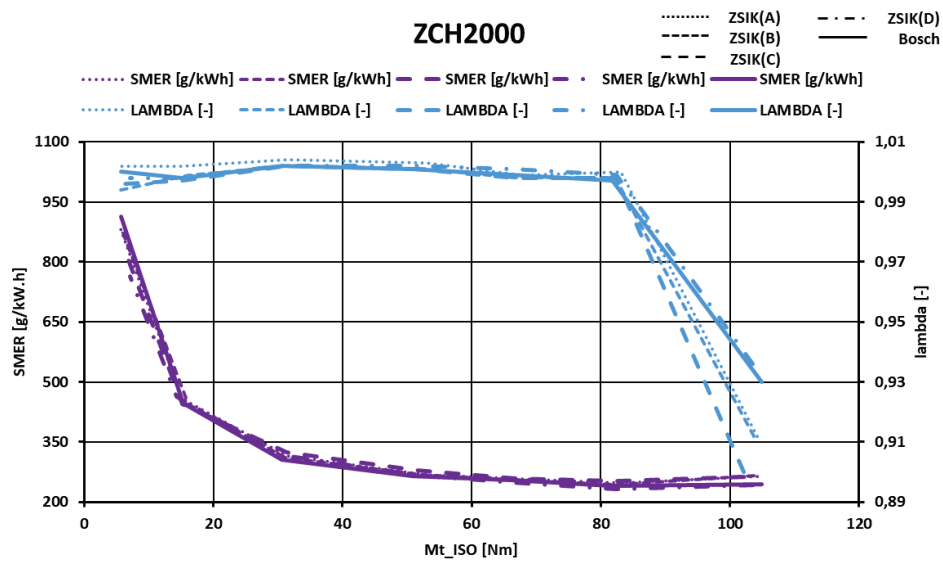


Obrázek A.20: Údaje o vyhoření náplně válce (Q5%, Q10%, Q50% a Q90%) při VOCH při provozu se ZS a ZSIK.

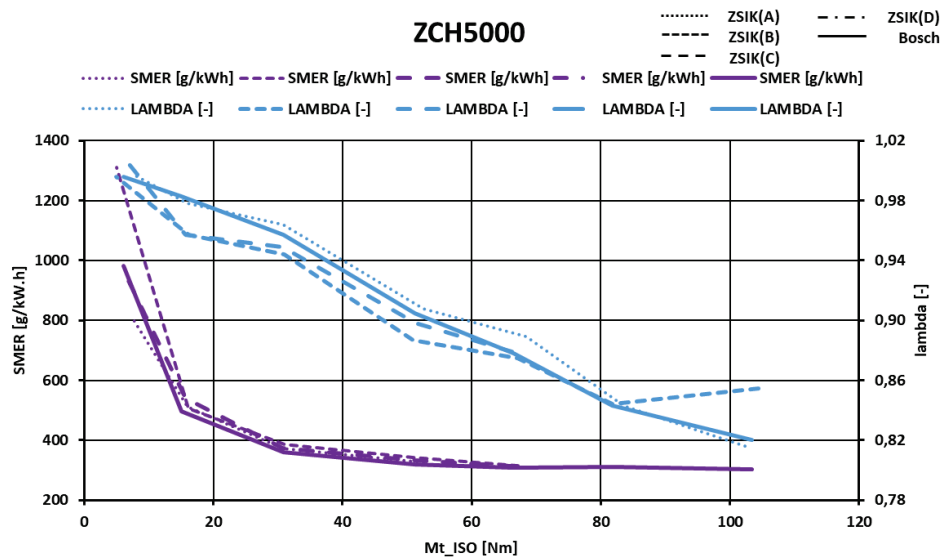


Obrázek A.21: Údaje o vyhoření náplně válce v počáteční fázi (Q5%-Q0%) při VOCH při provozu se ZS a ZSIK. Rychlejší počáteční fáze hoření je u ZSIK zřejmá.



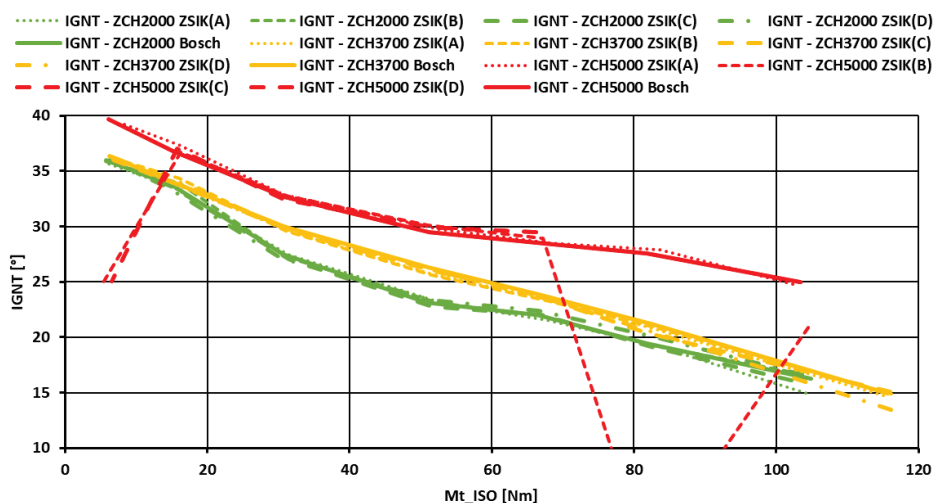


Obrázek A.22: Měrná spotřeba paliva a součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  při provozu motoru EA111 se ZSIK a ZS při ZCH2000.



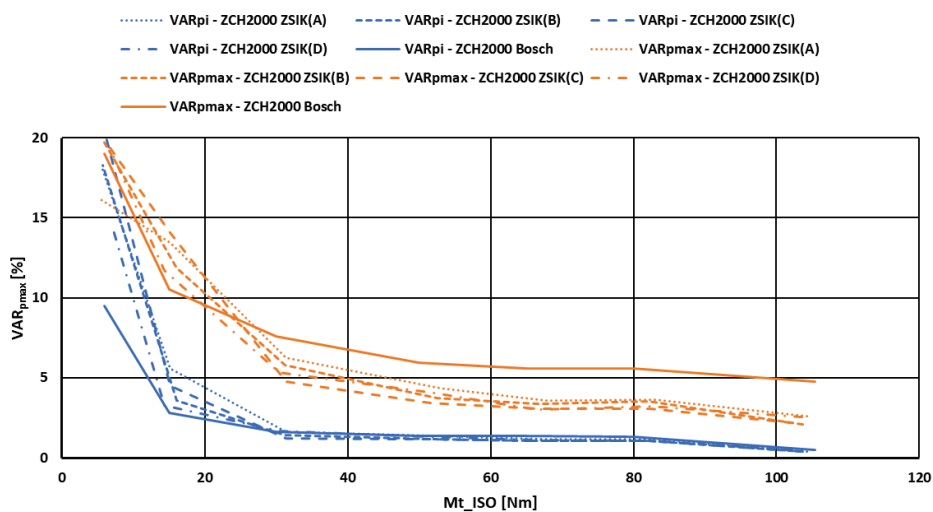
Obrázek A.23: Měrná spotřeba paliva a součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  při provozu motoru EA111 se ZSIK a ZS při ZCH5000.

### ZCH 2000, 3700, 5000

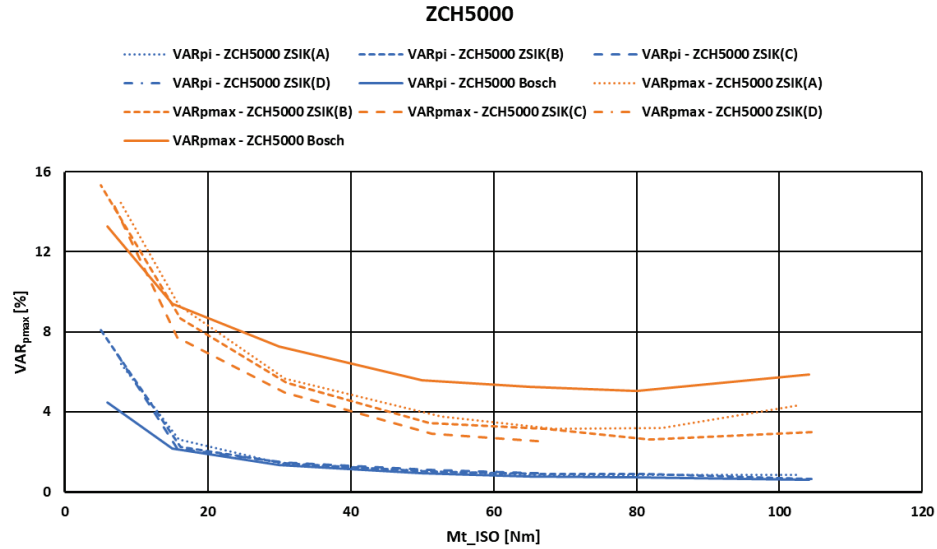


Obrázek A.24: Porovnání ZS a ZSIK - hodnoty předstihu zážehu při ZCH2000, ZCH3700 a ZCH5000.

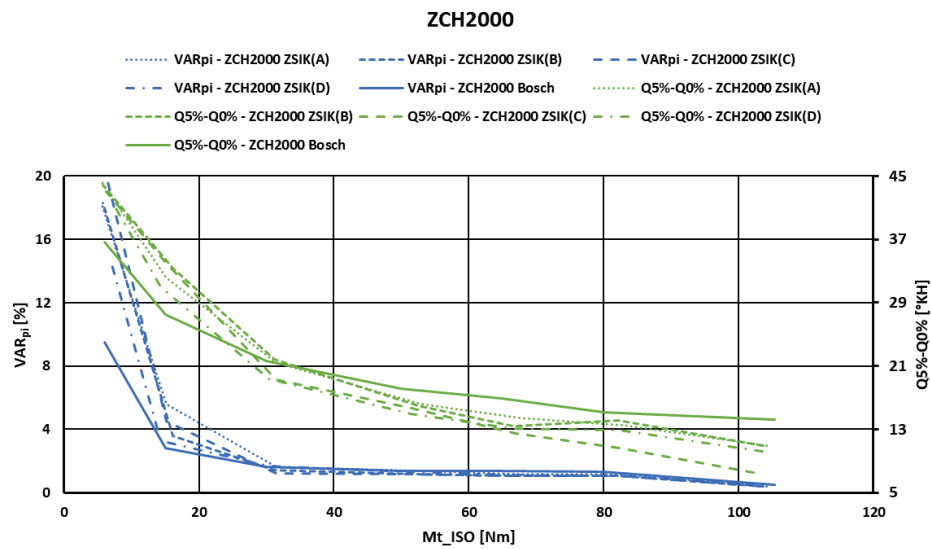
### ZCH2000



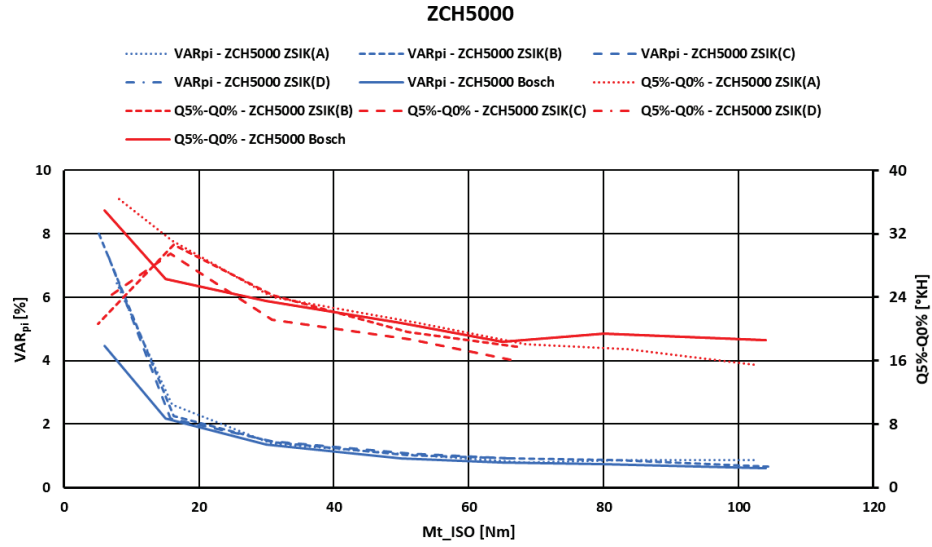
Obrázek A.25: V režimech ZCH2000 vykazuje ZSIK od cca 20% zatížení nižší hodnoty variability  $p_i$  než klasická ZS ( $VAR_{pmax}$  je v celém rozsahu zatížení významně nižší).



Obrázek A.26: V režimech ZCH5000 vykazuje ZSIK od cca 10% zatížení mírně vyšší hodnoty variability  $p_i$  než klasická ZS ( $VAR_{pmax}$  je v celém rozsahu zatížení významně nižší).



Obrázek A.27: Porovnání ZS a ZSIK - údaje o  $VAR_{p_i}$  a rychlosti rozvoje hoření v počáteční fázi (Q5%-Q0%) při ZCH2000.



Obrázek A.28: Porovnání ZS a ZSIK - údaje o VAR<sub>pi</sub> a rychlosti rozvoje hoření v počáteční fázi (Q5%-Q0%) při ZCH5000.

### A.3 Klasická zapalovací svíčka - vizualizace

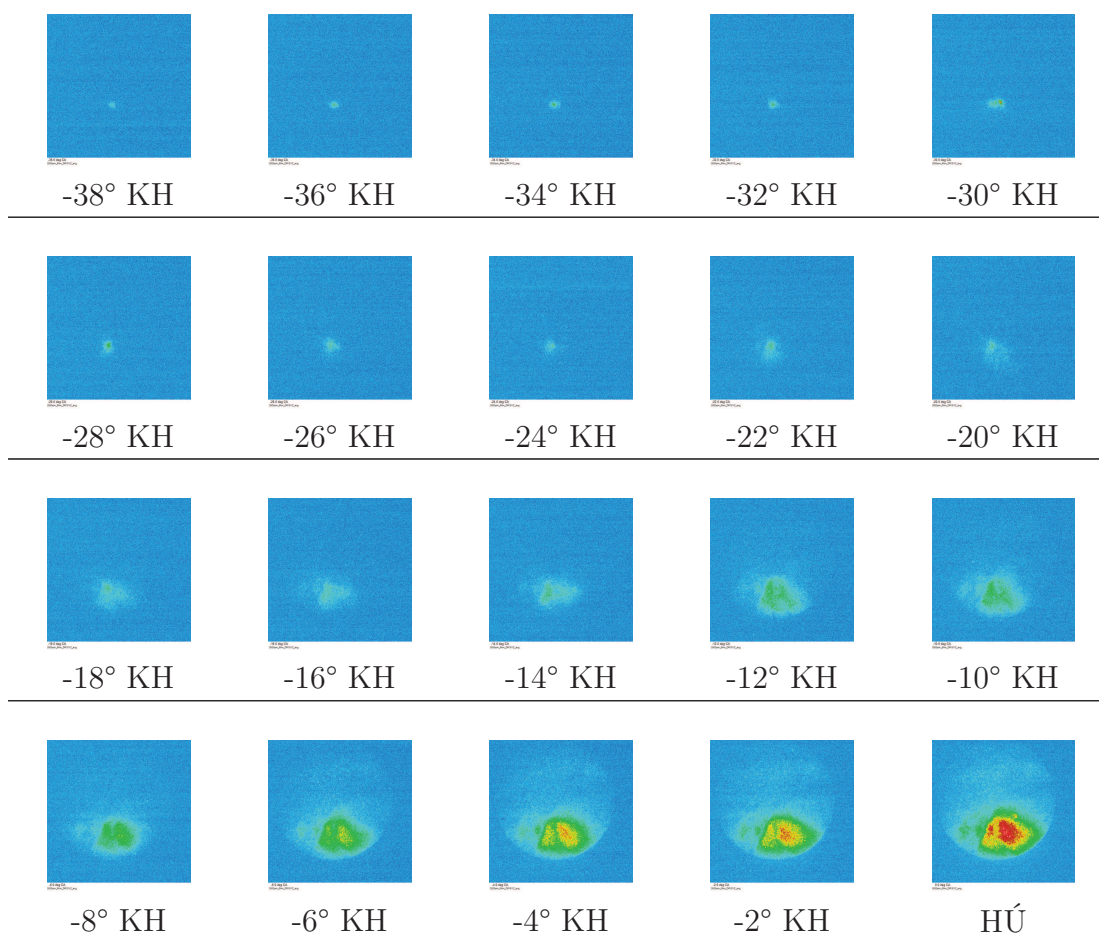
---

---

Brisk A:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm)

---

---



Tabulka 1.1: Brisk A:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm), předstih zážehu  $38^\circ$  KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZS, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZS a menší část prostoru válce pod ZS.

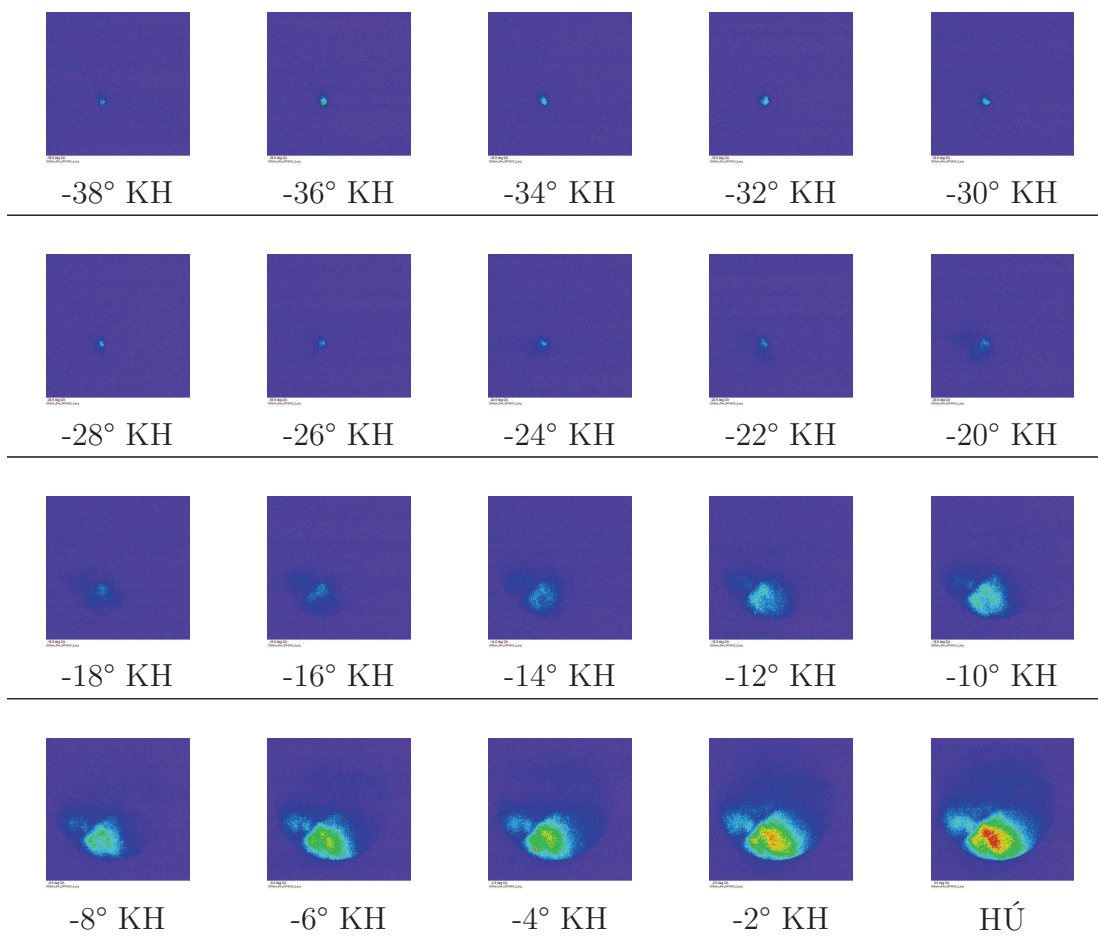
---

---

Brisk B:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm)

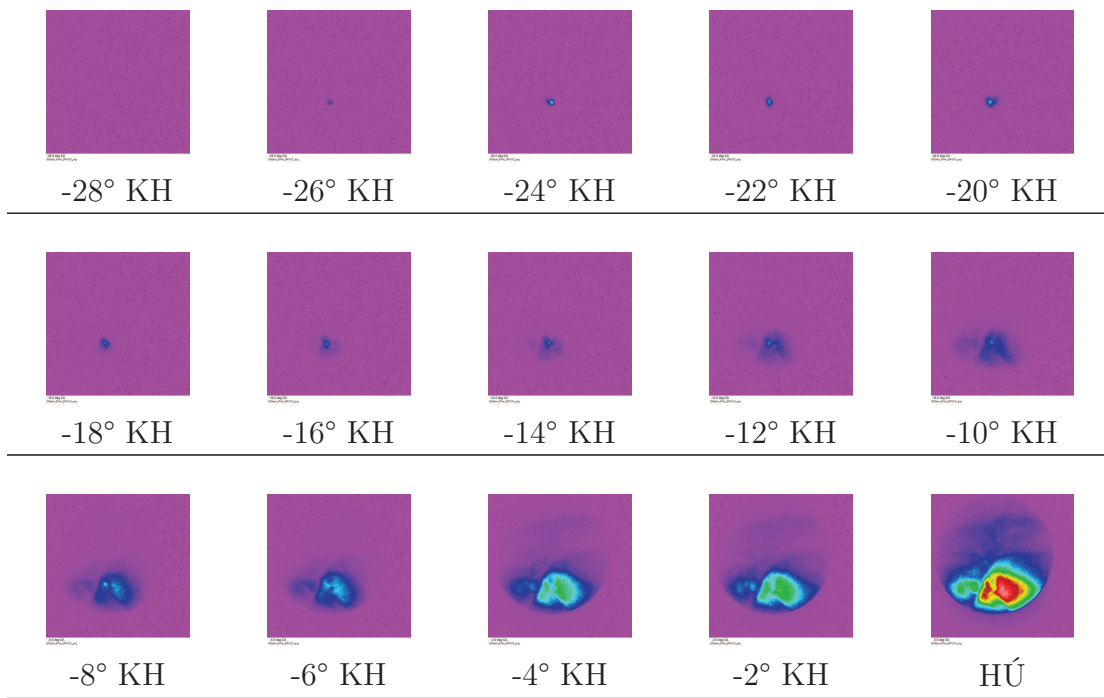
---

---



Tabulka 1.2: Brisk B:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm), předstih zážehu  $38^\circ\text{KH}$  před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZS, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZS a menší část prostoru válce pod ZS.

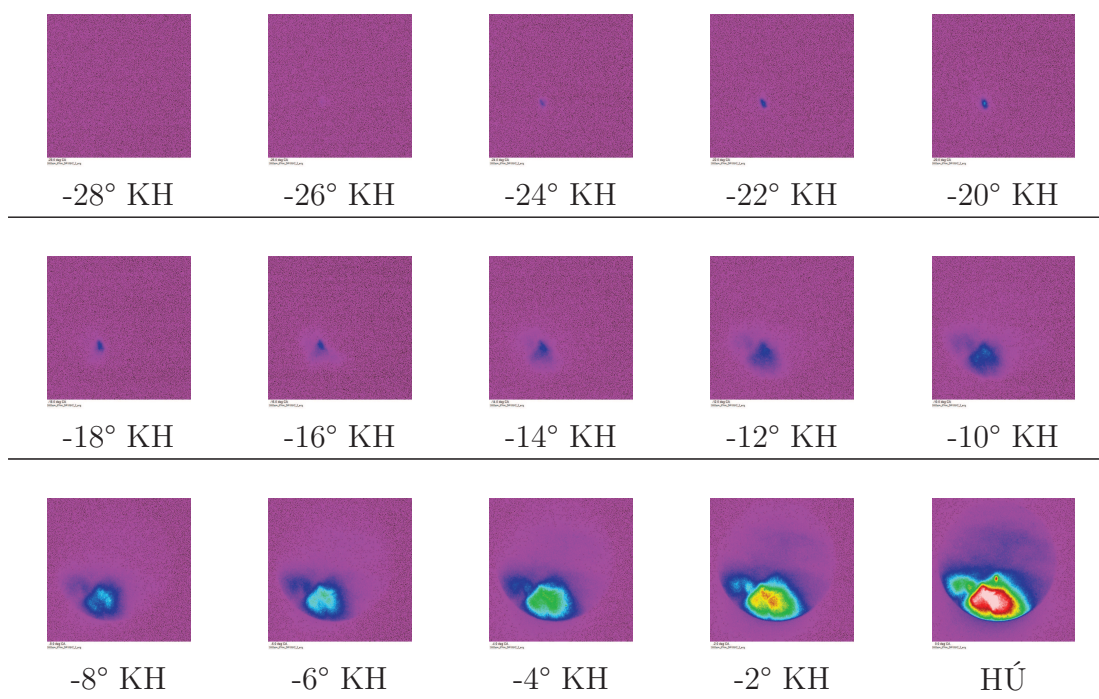
**Brisk A:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm)**



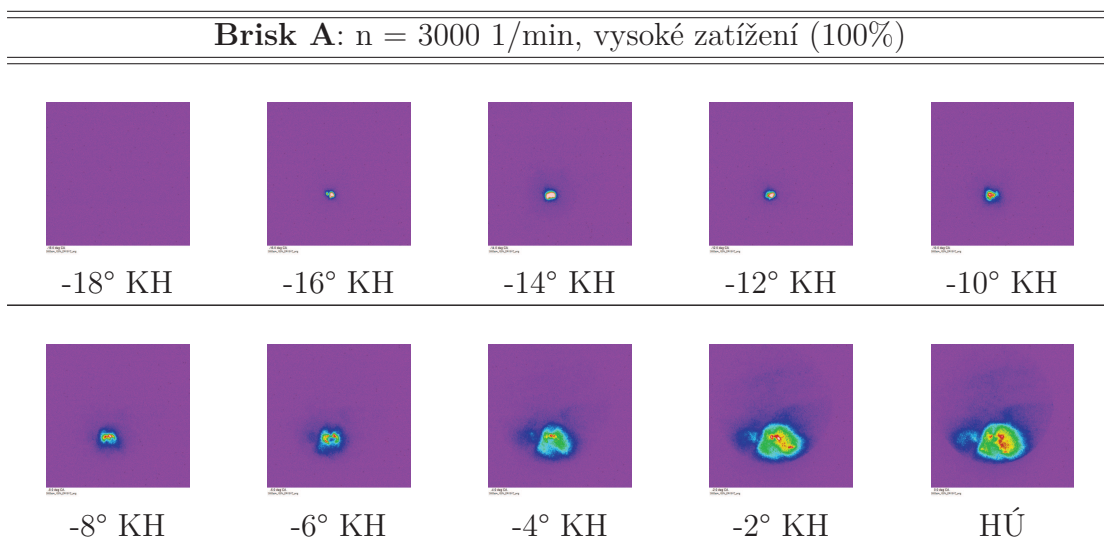
Tabulka 1.3: Brisk A:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm), předstih zážehu  $27^\circ$ KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZS, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZS a menší část prostoru válce pod ZS.



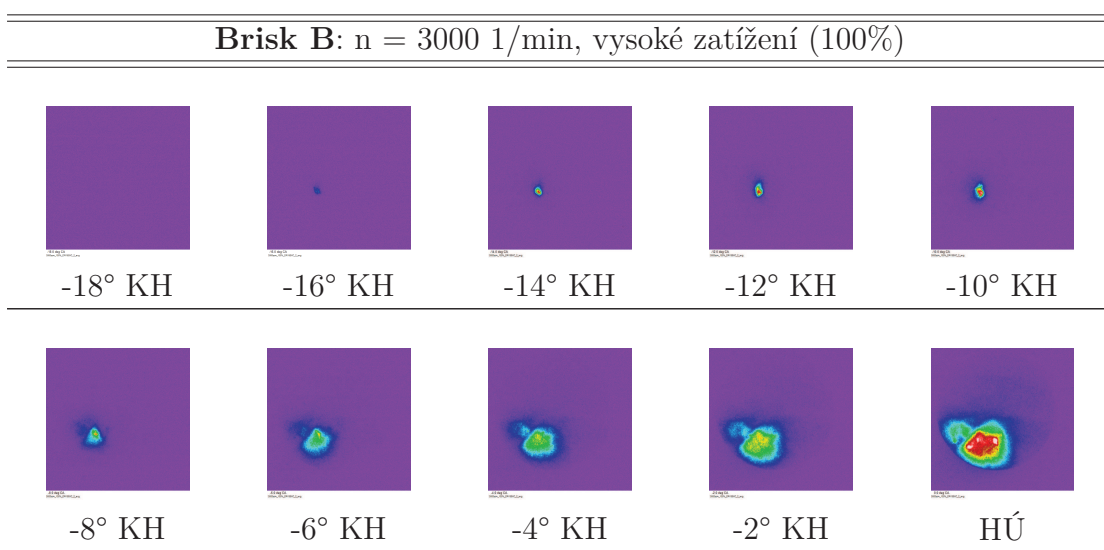
**Brisk B:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm)**



Tabulka 1.4: Brisk B:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm), předstih zážehu  $27^\circ\text{KH}$  před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZS, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZS a menší část prostoru válce pod ZS.



Tabulka 1.5: Brisk A:  $n = 3000$  1/min, vysoké zatížení (100%), předstih zážehu  $17^\circ\text{KH}$  před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZS, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZS a menší část prostoru válce pod ZS.



Tabulka 1.6: Brisk B:  $n = 3000$  1/min, vysoké zatížení (100%), předstih zážehu  $17^\circ\text{KH}$  před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZS, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZS a menší část prostoru válce pod ZS.

## A.4 ZSIK - vizualizace

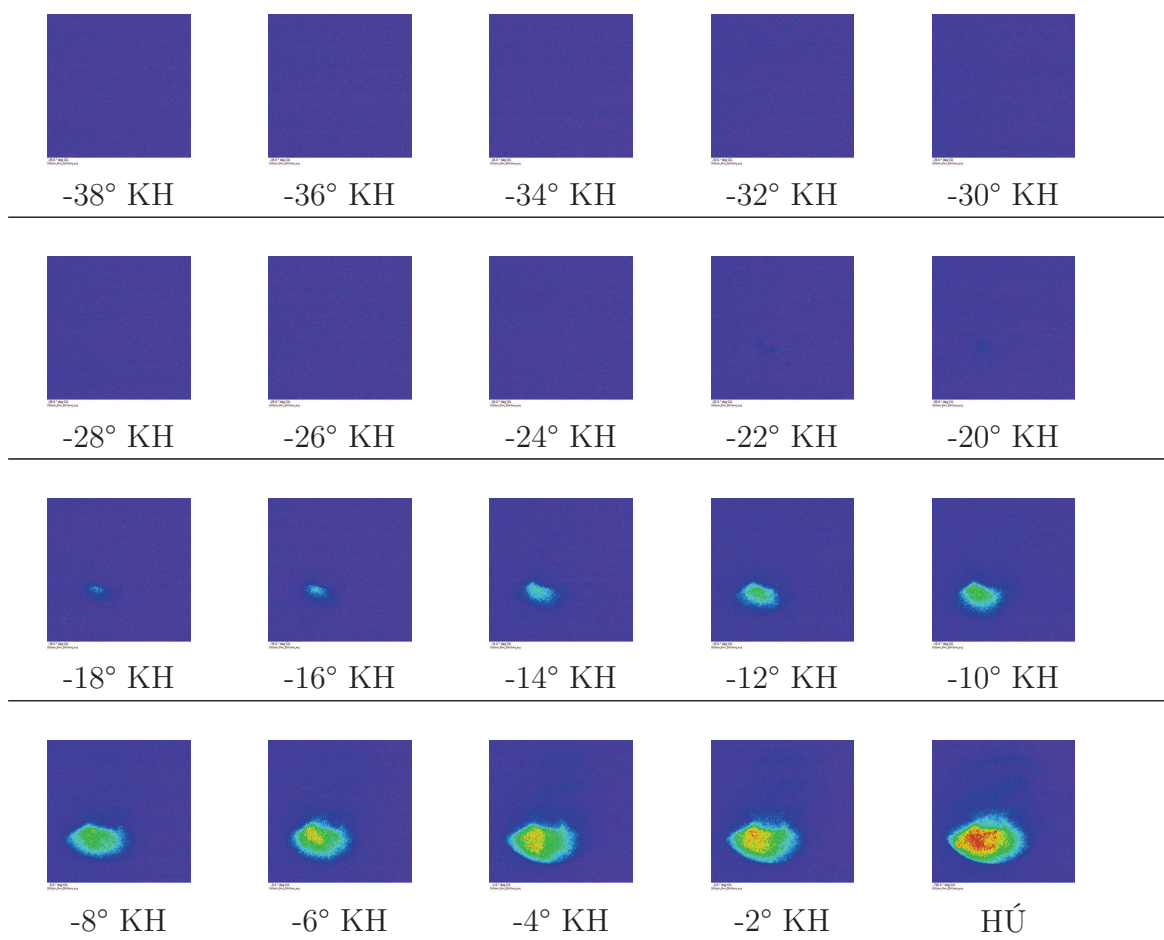
---

---

ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm)

---

---



Tabulka 1.1: ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm), předstih zážehu  $35^\circ$  KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.

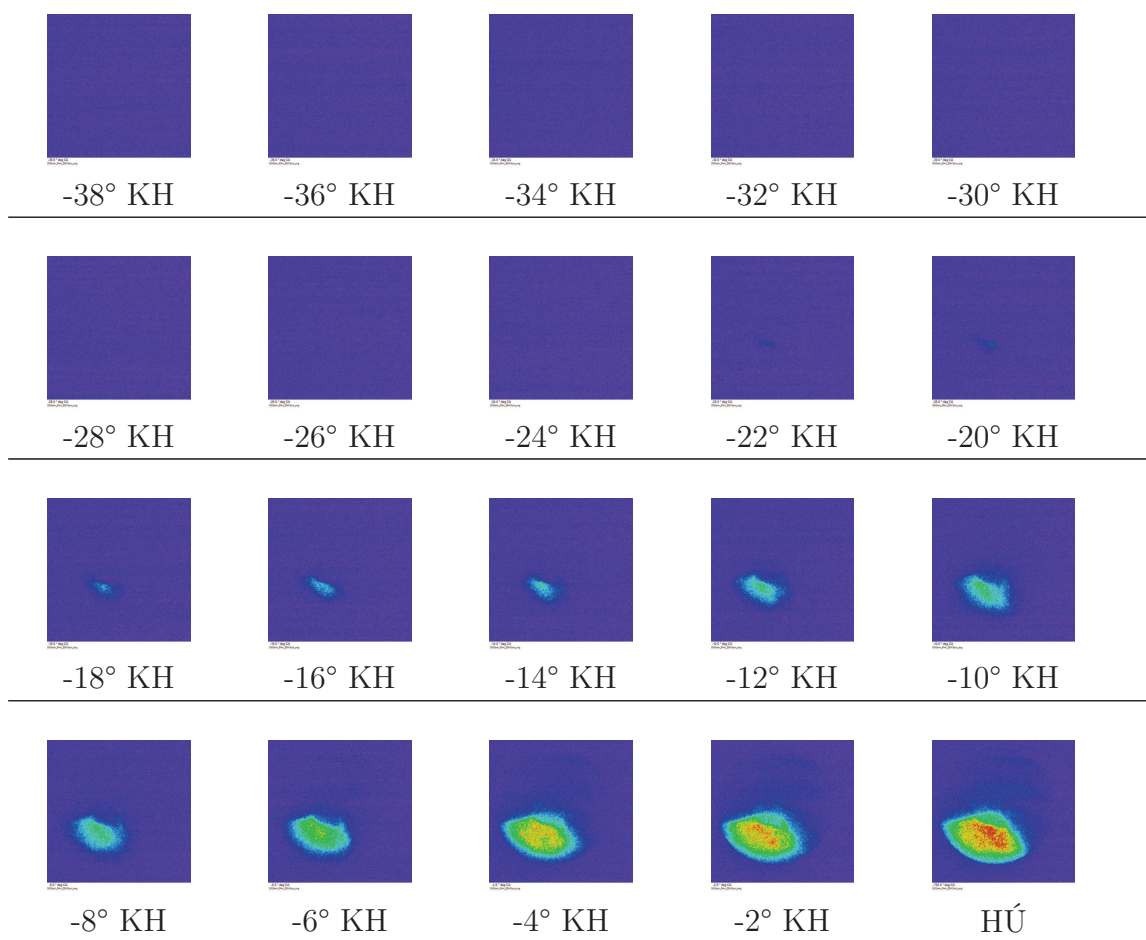
---

---

ZSIK - 3 otvory více zapuštěna:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm)

---

---



Tabulka 1.2: ZSIK - 3 otvory více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm), předstih zážehu  $35,5^\circ$  KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.

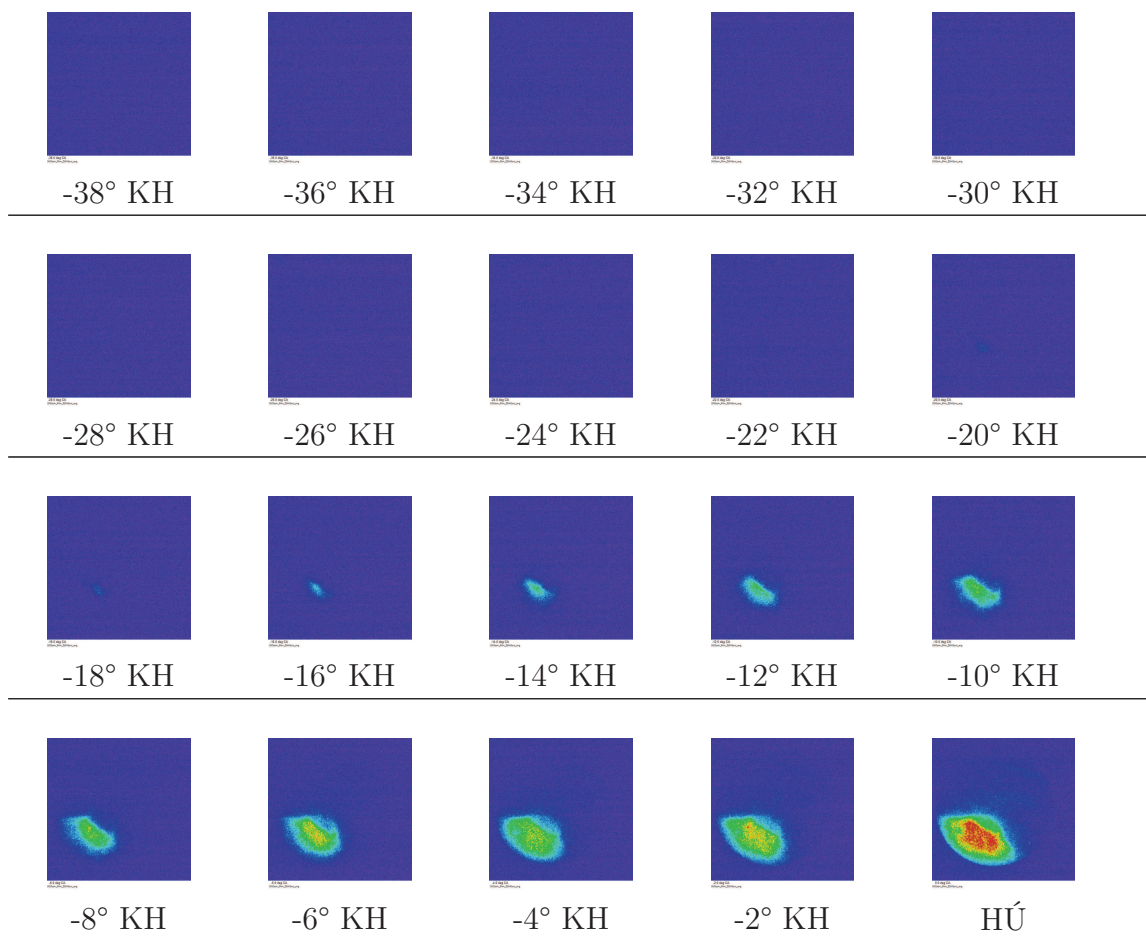
---

---

ZSIK - 6 otvorů více zapuštěna:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm)

---

---



Tabulka 1.3: ZSIK - 6 otvorů více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, velmi nízké zatížení (6Nm), předstih zážehu  $35,5^\circ$  KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.



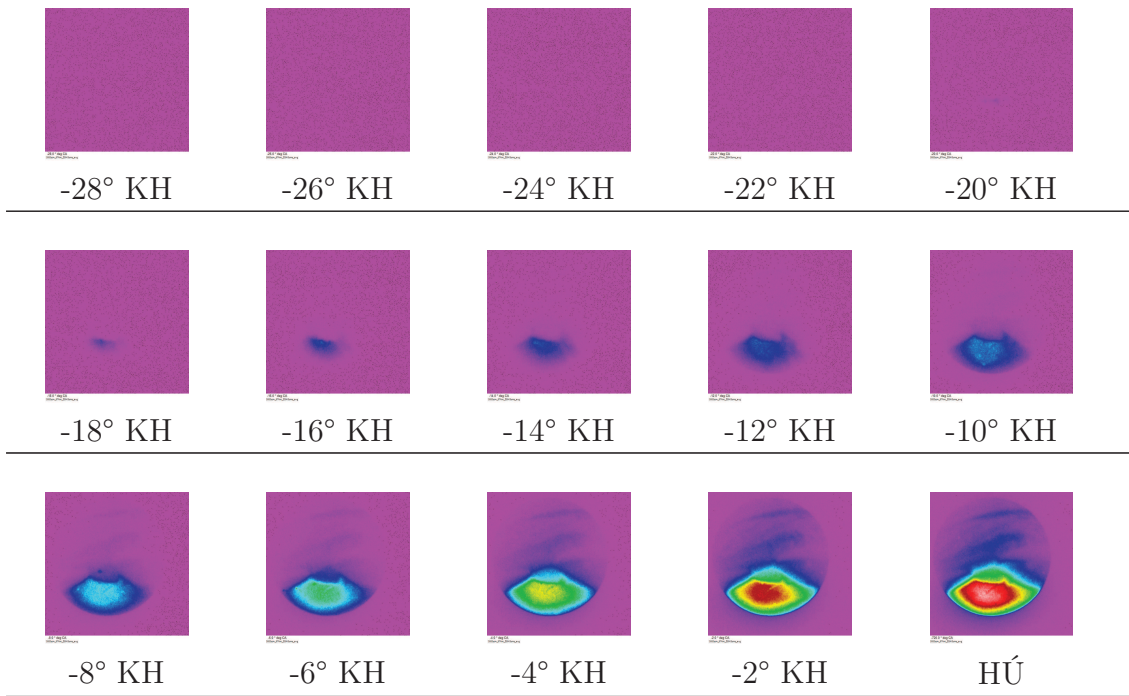
---

---

ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm)

---

---



Tabulka 1.4: ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm), předstih zážehu  $23^\circ$  KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.

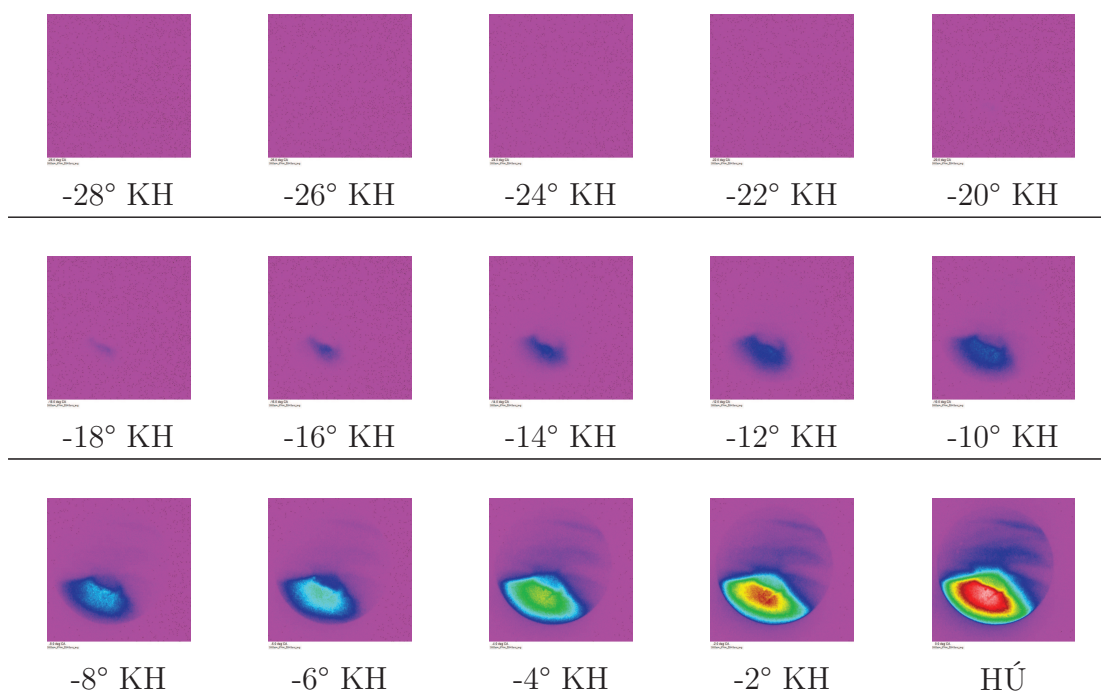
---

---

ZSIK - 3 otvory více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm)

---

---



Tabulka 1.5: ZSIK - 3 otvory více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm), předstih zážehu  $23^\circ$  KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.



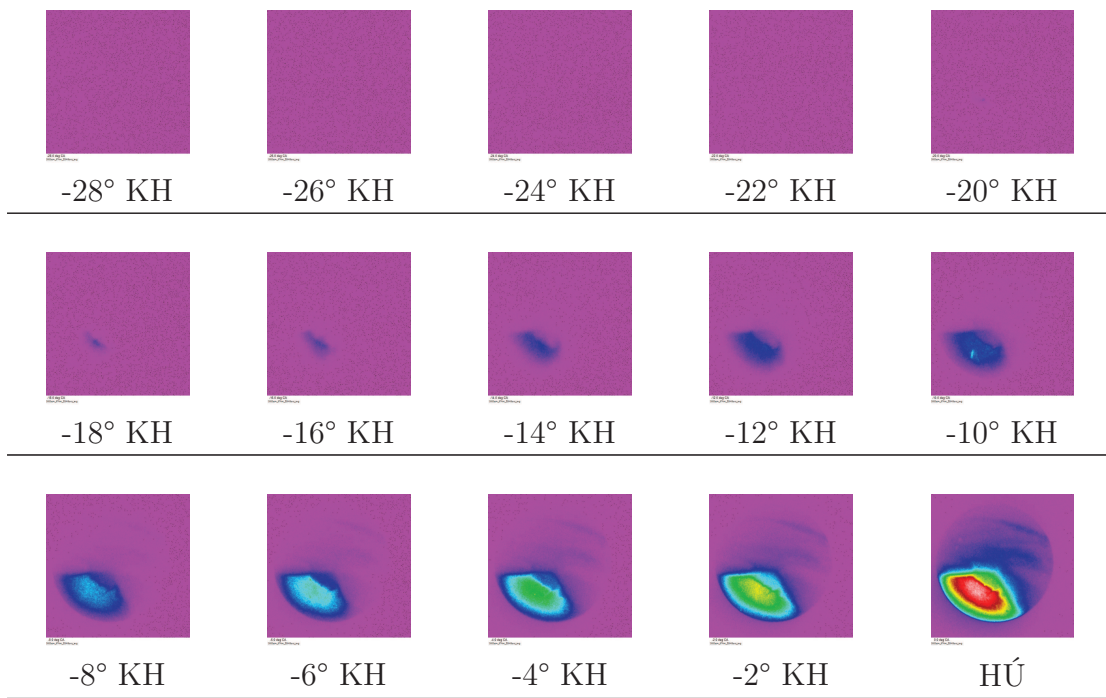
---

---

ZSIK - 6 otvorů více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm)

---

---



Tabulka 1.6: ZSIK - 6 otvorů více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, střední zatížení (67Nm), předstih zážehu 23°KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem 60° zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.

---



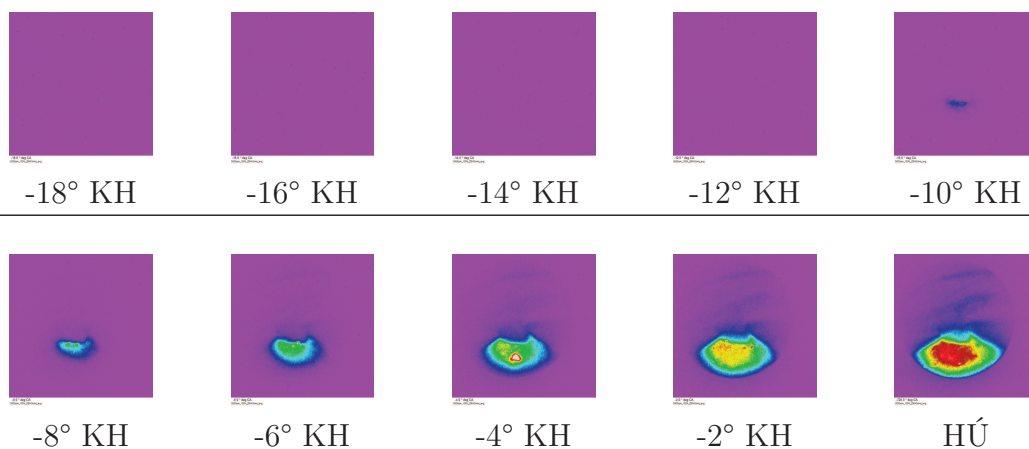
---

**ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, vysoké zatížení (100%)**

---



---



Tabulka 1.7: ZSIK - 3 otvory méně zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, vysoké zatížení (100%), předstih zážehu 14°KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem 60° zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.

---



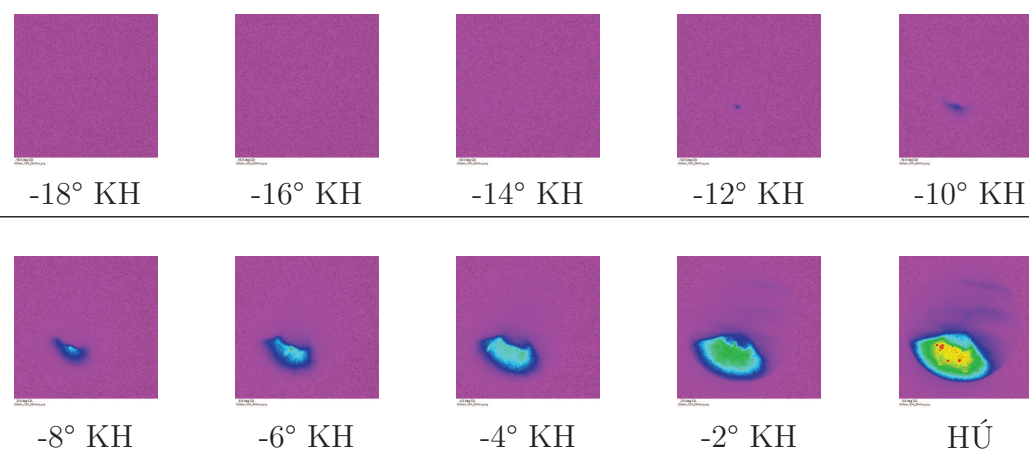
---

**ZSIK - 3 otvory více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, vysoké zatížení (100%)**

---



---



Tabulka 1.8: ZSIK - 3 otvory více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, vysoké zatížení (100%), předstih zážehu 12,5°KH před HÚ. Optika endoskopu s odklonem 60° zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.

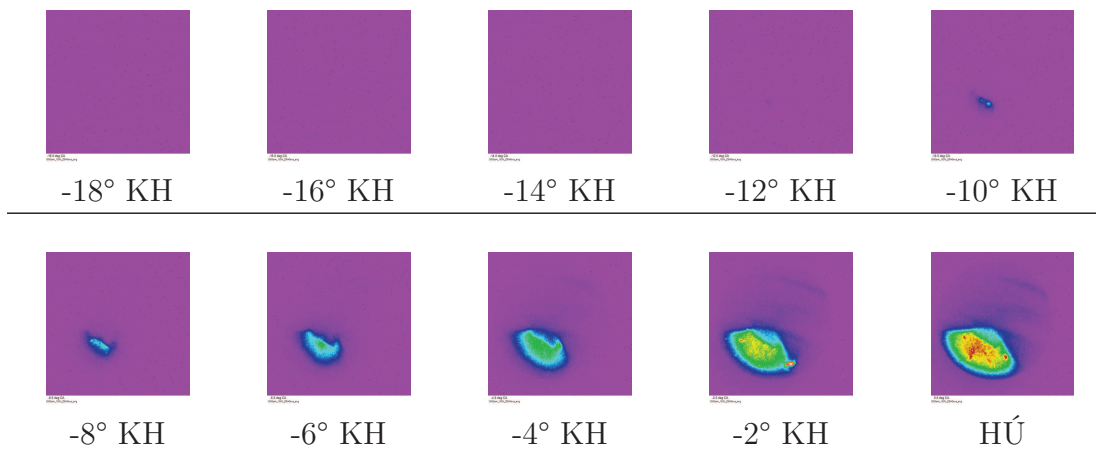
---

---

ZSIK - 6 otvorů více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, vysoké zatížení (100%)

---

---



Tabulka 1.9: ZSIK - 6 otvorů více zapuštěná:  $n = 3000$  1/min, vysoké zatížení (100%), předstih zážehu  $13,5^\circ\text{KH}$  před HÚ. Optika endoskopu s odklonem  $60^\circ$  zaznamenává v zorném kuželu pohled na ZSIK, větší část kompresního prostoru v hlavě válce v oblasti ZSIK a menší část prostoru válce pod ZSIK.

## A.5 Jednojiskrová zapalovací cívka

