



U N I V E R Z I T A
L I B E R E C

F A K U L T A
M E C H A N I C K É
I N Ž E N Ý R S T V Í

Zapalovací systémy pro zážehové spalovací motory

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T010 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Bc. Jan Havel**
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.



A R O B R
a o e a a g e e g

Ignition systems for gasoline engines

Diploma thesis

Study programme: N2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2302T010 – Machine and Equipment Systems
Author: **Bc. Jan Havel**
Supervisor: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Liberec 2016



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Havel**

Osobní číslo: **S15000669**

Studijní program: **N2001 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce strojů a zařízení**

Název tématu: **Zapalovací systémy pro zážehové spalovací motory**

Zadávací katedra: **Katedra vozidel a motorů**

Zásady pro vypracování:

1. Na základě literární rešerše stručně shrňte způsoby používané k zapálení palivové směsi v zážehových motorech a proveďte jejich kritické hodnocení.
2. Podrobněji popište způsob zapalování palivové směsi laserovým paprskem.
3. Navrhněte uspořádání laserového zapalování vhodného pro průmyslový motor na zemní plyn.

Rozsah grafických prací: **Výkresová dokumentace**

Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran textu vč. příloh**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1.] **Robert Bosh GmbH: Autoelektrik Autoelektronik am Ottomotor. Berlin: Springer-Verlag, 2014.**
- [2.] Odborná a firemní literatura dostupná na *www* zabývající se elektrickým zapalováním palivové směsi v zážehových motorech

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Katedra vozidel a motorů

Datum zadání diplomové práce:

1. září 2016

Termín odevzdání diplomové práce:

27. května 2016

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
Děkan

Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
Vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou 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 diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou 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.

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

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

Datum:

Podpis:

Poděkování

Rád bych zde poděkoval doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za ochotu, trpělivost a celou řadu cenných rad při tvorbě mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Mazačovi a Ing. Luboši Dittrichovi za pomoc při spolupráci.

Abstrakt

Zapalovací systémy zážehových spalovacích motorů jsou nedílnou součástí už od doby prvního zkonstruování zážehového motoru. Jednotlivé zapalovací systémy procházely postupným vývojem, jak si zrovna žádala daná doba. Od některých systémů bylo upuštěno, zatímco některé se pro svou spolehlivost a jednoduchost používají dodnes, byť už jen u malých spalovacích motorů. Na konci 20. století se objevily další nové systémy, které se od předchozích dosti liší svou konstrukcí a způsobem zapalování. O těchto nových a starých systémech zapalování zážehových spalovacích motorů pojednává tato diplomová práce. Podrobně je v diplomové práci pojednáno o laserovém zapalování a jeho konstrukční variantě na motoru TEDOM.

Klíčová slova: zapalovací systémy, zapalovací svíčka, vysokofrekvenční zapalování, laser, laserové zapalování

Abstract

Ignition systems of petrol engines are an integral part ever since the construction of the first petrol engine. Individual ignition systems undergoing gradual evolution, just as you asked for a given period. Since some systems have been abandoned, while some also for their reliability and ease of use to this day, even if only in small internal combustion engines. At the end of the 20th century, there were other new systems that are quite different from previous its construction and manner of ignition. These new and old systems, ignition petrol engines discussed in this thesis. As detailed in the thesis deals with laser ignition and its constructive variation on the engine TEDOM.

Keywords: ignition systems, spark plugs, corona ignition, laser, laser ignition

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Zapalovací svíčka	12
2.1. Elektrodová vzdálenost	14
2.1.1. Poloha jiskry a doskok jiskry	14
2.2. Druhy elektrických výbojů.....	15
2.2.1. Samostatné výboje	15
2.2.2. Nesamostatné výboje	16
2.3. Vliv tlaku a poskokové vzdálenosti na přeskokové napětí	17
2.4. Jiskřiště zapalovací svíčky a jeho přeskokové napětí	17
2.5. Zapalovací svíčka ve spojení se zapalovacím systémem.....	19
2.6. Nároky kladené na zapalovací svíčku	21
2.7. Tepelná hodnota a vedení tepla	23
3. Základní rozdělení zapalovacích systémů	25
4. Magnetové zapalování	26
4.1. Magnetové kontaktní zapalování	26
4.2. Magnetové bezkontaktní zapalování.....	28
5. Bateriové zapalování.....	30
5.1. Bateriové kontaktní zapalování.....	30
5.1.1. Složení bateriového kontaktního zapalování	30
5.1.2. Činnosti bateriového kontaktního zapalování.....	33
5.1.3. Bateriové kontaktní tranzistorové zapalování.....	34
5.1.4. Bateriové kontaktní tyristorové zapalování	34
5.1.5. Bateriové kontaktní elektronické zapalování.....	35
5.2. Bateriové bezkontaktní zapalování	35
5.2.1. Bateriové bezkontaktní elektronické zapalování	36
6. Piezoelektrické zapalování	37

7.	Vysokofrekvenční zapalování	39
7.1.	Vysokofrekvenční zapalování EcoFlesh	40
7.1.1.	Zvýšení tolerance EGR při částečném zatížení	42
7.1.2.	Dlouhodobé zkoušky motoru	43
8.	Laserové zapalování	44
8.1.	Princip laseru	45
8.2.	Historie laseru	48
8.3.	Laserové zapalovací systémy	49
8.4.	Druh použitého laseru	50
8.5.	Mikrolaserový laser s pasivním Q-spínáním pro zapalování	51
8.6.	Laserové zapalování u motoru na propan	52
8.7.	Laserové zapalování u motoru na CNG	55
8.7.1.	Uspořádání systému pro laserové zapalování	56
8.7.2.	Výsledky měření	58
8.7.3.	Vyhodnocení měření	68
9.	Funkční vzorek motoru s laserovým zapalováním	69
9.1.	Úprava hlavy válců pro laserový zapalovací modul a zvýšení	69
	kompresního poměru motoru	69
10.	Závěr	74
	Literatura	76
	Seznam obrázků a tabulek	78
	Obrázky	78
	Tabulky	80
	Seznam použitých zkratk	81
	Zkratky	81
	Jednotky	82
	Přílohy	83

1. Úvod

Zapalovací systémy od vynalezení pístového spalovacího motoru procházely svým dlouhým vývojem, který zahrnoval ty nejprimitivnější způsoby až po propracované systémy používané dnes. U spalovacích motorů existují prakticky dva způsoby zapalování paliva v pracovním prostoru. U vznětových motorů se jedná o zapalování směsi kompresní teplotou a u zážehových motorů jde o zapalování směsi vysokonapěťovou jiskrou.

První (dvoudobý) spalovací motor na světě vynalezený Jeanem Josephem Etienne Lenoirem (1822-1900) v roce 1860 byl poháněn svítivým plynem a vybaven elektrickým zapalováním. Zapálení směsi obstarávaly platinové elektrody napájené z cívky a Ruhmkorffova induktoru. Tento způsob zapalování směsi na čas ustoupil a nahradil jej plamínek (plamínek, který za pomoci šoupátek zapaloval směs), nebo zapalování za pomoci žárové trubky. Výše zmíněné zapalování směsi za pomoci plamínku používal v roce 1867 i dvoudobý spalovací motor, který zkonstruoval Nicolaus August Otto (1832-1891). Otto však v roce 1876 zkonstruoval první čtyřdobý zážehový plynový motor, který používal k zapálení směsi elektrické zapalování. Tento motor ovšem ještě nepoužíval zapalovací svíčku, ale kontakty, které při odtržení vytvářely potřebné jiskry. Jednou z nevýhod tohoto zapalování bylo, že fungovalo maximálně do otáček 400 min^{-1} . V roce 1884 přišel Otto se zdokonalením zapalování za pomoci nízkonapěťového magneta.

Zapalování elektrickou jiskrou je velice výhodné z důvodu přesného nastavení okamžiku zapálení směsi v pracovním prostoru, což zvyšuje výkon a účinnost motoru. Další výhodou je poměrně snadné umístění střediska zapálení směsi do vhodné polohy ve spalovacím prostoru se zřetelem na rychlost hoření směsi a na způsob šíření plamene. Aby bylo docíleno výše zmíněných výhod elektrického zapalování, bylo zapotřebí dvou důležitých věcí. Vhodný zapalovací systém a zařízení umožňující zapálení směsi.

Prvním počinem v tomto problému bylo počáteční inicializační zapálení směsi paliva pomocí vysokonapěťového magneta v roce 1901 v jedné opravně ve Stuttgartu, která patřila firmě Bosch. Dne 7. ledna 1902 byla firmě Bosch patentována zapalovací svíčka s kombinací výše uvedeného vysokonapěťového magneta. Je dobré se také

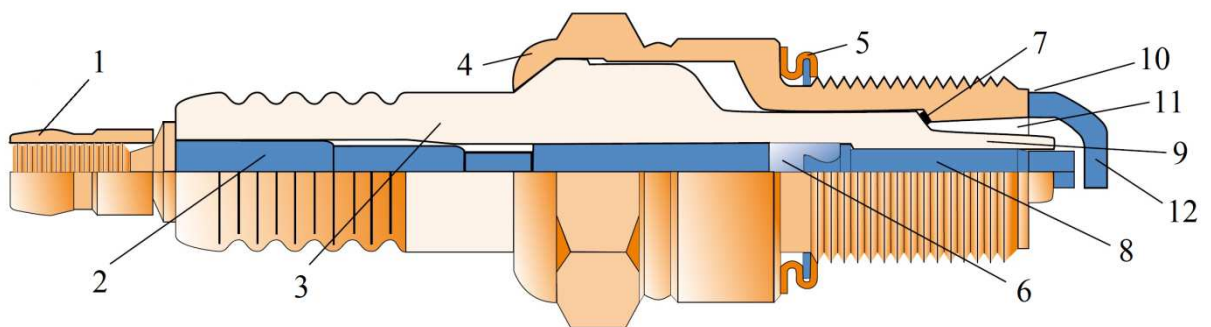
zmínit, že zapalovací svíčku vynalezli v roce 1898 nezávisle na sobě Nikola Tesla a Frederick Richard Simms. Někdy se uvádí za vynálezce zapalovací svíčky i Karl Benz. Ovšem prvenství ve vynalezení zapalovací svíčky, tak jak ji známe dnes, patří firmě Bosch.

Bateriové zapalování přišlo na svět v roce 1909, kdy jej zkonstruoval Charles Franklin Kettering (1876-1958) a poprvé jej začala používat automobilka Cadillac v roce 1910. Tento typ zapalování začal pomalu vytlačovat magnetové zapalování mezi dvěma světovými válkami. Jak u magnetového, tak i u bateriového zapalování bylo zapotřebí mechanického rozdělovače, což ovšem přinášelo řadu nevýhod. Jako například oxidaci kontaktů rozdělovače a jejich velké elektrické namáhání, horší startování za studena, nežádoucí změna předstihu a pokles výkonu jiskry při vyšších otáčkách motoru. Tyto nevýhody řeší elektronické bezkontaktní zapalování (existovalo i elektronické zapalování s klasickým rozdělovačem). Rozvoj tohoto druhu zapalování nastal po druhé světové válce, kdy na scénu přišly výkonné polovodičové spínače, které mohly nahradit mechanický přerušovač tyristorem. Prvním automobilem v Československu, který byl vybaven elektronickým bezkontaktním zapalováním PAL-Magneton Kroměříž, se stala 1. 12. 1973 Tatra 2-603 s motorem Tatra 603 H.

V dnešní době tedy najdeme automobily pouze s plně elektronickým zapalováním řízeným mikropočítačem. Jistou změnou v zapalovacích systémech by mělo přinést vysokofrekvenční zapalování a laser. O laserovém zapalování se už uvažovalo v 70. letech 20. století, ale v této době nebylo možné sestrojít dostatečně malý a výkonný laser na to, aby ho bylo možné nainstalovat do spalovacího motoru.

2. Zapalovací svíčka

Jak už bylo řečeno v úvodu, zážehové motory mají na rozdíl od vznětových motorů externí zapalování. V průběhu kompresního zdvihu dojde k zapálení stlačené směsi paliva a vzduchu pomocí elektrické jiskry na zapalovací svíčce. O tvorbu této jiskry se tedy stará zapalovací impuls. Vzniká díky vysokému napětí generované zapalovací cívkou a přeskakuje mezi elektrodami. Od jiskry se pak šíří čelo plamene do celého spalovacího prostoru, dokud se směs nespálí. Uvolněné teplo způsobuje ohřev, ve válci prudce stoupá tlak a píst je tlačěn směrem dolů (pracovní zdvih). Tento pohyb je pak díky ojnici přenášen na klikový hřídel a ten pohání vozidlo prostřednictvím spojky, převodovky a náprav. [1] Řez zapalovací svíčkou a její popis je na obr. 1.



Obr.1: Řez zapalovací svíčkou a její popis

1 - Konektor zapalovací svíčky s konektorem typu SAE, starší vozy jsou osazeny konektory se závitem M4. Slouží k přívodu zapalovacího napětí ke středové elektrodě.

2 - Ocelový dřík (tzv. dřík zapalovací svíčky) vzduchotěsně zalitý ve vodivé sklovité tavenině zajišťuje spojení se středovou elektrodou.

3 - Keramický izolátor na bázi oxidu hlinitého izoluje středovou elektrodu vůči uzemnění při napětí až 40 000 V. Izolátor se vyrábí zejména profilovaný, které brání tvorbě výbojů, ale existují i izolátory v hladkém provedení.

4 - Těleso svíčky je poniklováno a vzduchotěsně spojeno s izolátorem využitím procesu tepelného smrštění, a proto oblast smrštění vykazuje modré oxidační zbarvení. Závit slouží k upevnění zapalovací svíčky do bloku motoru (můžou mít různou velikost podle určení).

5 - Nespádávající vnější těsnicí podložka k utěsnění a odvodu tepla, zde rozeznáváme

dva typy těsnění (obr. 2). Ploché nebo rovné sedlo, kde funkci přebírá nespádávající těsnící kroužek kolem tělesa svíčky). A kuželové nebo kónické sedlo, kde kuželovitá plocha tělesa svíčky pasuje do příslušně tvarované styčné plochy v hlavě válců a zajistí se tak utěsnění.

6 - Elektrické spojení dříku a středové elektrody. U odrušených typů (R typů) odporová skelná tavenina. Vhodnými aditivami lze definovaně ovlivnit stupeň odporu skelné taveniny tak, aby se dosáhlo požadované odolnosti vůči opalu a odrušovací charakteristik.

7 - Vnitřní těsnící kroužek tvoří vzduchotěsné spojení mezi izolátorem a kovovým tělesem a stará se o odvod tepla.

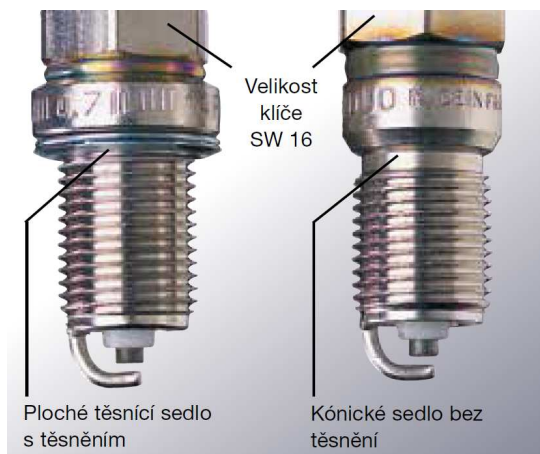
8 - Středová elektroda se skládá z měděného jádra zapouzdřeného v niklovém plášti. V závislosti na typu může být středová elektroda z platiny, iridia a stříbra.

9 - Činná část izolátoru zasahuje až do spalovací komory. Má zásadní vliv na tepelnou hodnotu.

10 - Zkosená vodící hrana usnadňuje zašroubování zapalovací svíčky do bloku motoru.

11 - Část zasahující do kompresního prostoru ovlivňuje samočisticí schopnost.

12 - K tělesu zapalovací svíčky je přivařena buď jedna, nebo více uzemňovacích elektrod, které společně se středovou elektrodou tvoří dráhu jiskry. Speciálně vyvinuté slitiny na bázi niklu (nebo platinové, či titanové výztuže) zvyšují odolnost vůči opalu elektrod. [1]



Obr.2: Řez zapalovací svíčkou s jejím popisem [1]

2.1. Elektrodová vzdálenost

Nejkratší vzdálenost mezi středovou a uzemňovací elektrodou zapalovací svíčky (viz obr. 2) se nazývá vzdálenost elektrod (neboli doskok). Tuto vzdálenost musí přeskočit zapalovací jiskra. Optimální vzdálenost elektrod v různých situacích závisí částečně na motoru a stanovuje se v těsné spolupráci s příslušnou automobilkou. Dodržení vzdálenosti elektrod je potřeba věnovat maximální pozornost, neboť nesprávná vzdálenost může značně zhoršit funkčnost svíčky, a tím i výkonnost motoru. Příliš krátká vzdálenost elektrod může mít za následek chybné zapalování (vynechání), hlučný chod motoru při volnoběhu a nevyhovující hodnoty emisí výfukových plynů. Příliš velká vzdálenost elektrod může také vést k vynechání zapalování. U svíček s více elektrodami odpadá nutnost nastavení vzdálenosti elektrod díky koordinovanému polohování jiskry. [1]



Obr.3: Elektrodová vzdálenost [1]

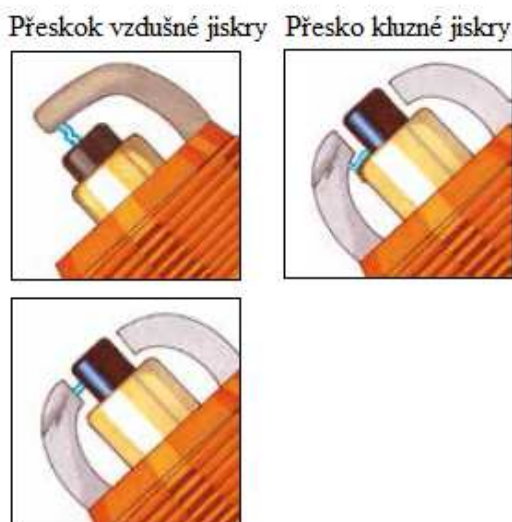
2.1.1. Poloha jiskry a doskok jiskry

Funkci zapalovací svíčky ve spalovací komoře ovlivňují tři hlavní faktory. U zapalovacích svíček s technologií klouzavé jiskry jsou to poloha jiskry, přeskok jiskry (viz. obr. 2) a vzdálenost elektrod (doskok). Poloha jiskry je název, který vymysleli vývojáři motorů pro geometrické uspořádání dráhy jiskry. Jde tedy o míru, do jaké dráha jiskry zasahuje do spalovací komory. Ve vztahu k zapalovací vzdálenosti se rozlišuje mezi:

- a) Dráhou, kterou absolvuje vzdušná jiskra mezi středovou a uzemňovací elektrodou, aby zapálila směs paliva/vzduchu ve spalovací komoře.
- b) Dráhou, kterou absolvuje kluzná jiskra způsobem, že nejprve klouže po povrchu

činné části izolátoru a následně přeskočí na uzemňovací elektrodu. Absolvováním této dráhy jiskra spaluje škodlivé usazeniny a zbytky po spalování.

- c) Dráhou vzdušné jiskry/Dráhou kluzné jiskry: přeskoky, které se mohou uskutečnit přes vzduch a izolátor. Zkombinováním vzájemně nezávislých drah vzdušných a kluzných jisker lze omezit opal elektrod a zapalovací svíčky, ta vydrží výrazně déle. [1]



Obr.4: Přeskok jiskry [1]

2.2. Druhy elektrických výbojů

Elektrické výboje se dělí na samostatné (ustálené) a nesamostatné. U ustáleného (samostatného) výboje udržuje vodivost plynu sama sebe, načež u nesamostatného výboje nutno udržovat tím, že se na plyn působí vnějším činitelem, jenž činí plyn vodivým. Zde budou rozebrány pouze některé druhy, které mají význam pro činnost zapalovací svíčky.

2.2.1. Samostatné výboje

Oblouk patří do skupiny ustálených výbojů. Vzniká při dostatečně malém vnitřním odporu zdroje a obvodu. Je charakterizován vysokou teplotou ve výbojové dráze, při níž se vytvoří 4. stav hmoty, tak zvaně termická plazma. Zahřejeme-li plyn na teplotu několika tisíc stupňů, dochází k rozpadu chemických sloučenin a k disociaci na volné atomy. Při vysoké teplotě jsou atomy částečně ionizovány (termická ionizace) a

vznikají z nich kladné ionty a záporné elektrony ve stejném počtu. Plazma je tedy směsí neutrálních, kladně a záporně nabitých částic. Jejich náboje se navzájem kompenzují, takže plazma se jeví navenek jako neutrální. Vyznačuje se značnou vodivostí a může propouštět i elektrické proudy značných intenzit. Vysoká teplota plazmy se udržuje Joulovým teplem. Oblouk obsahuje nejen ionizovaný plyn, ale i kovové páry z elektrod. [2]

2.2.2. Nesamostatné výboje

a) Nesamostatný výboj způsobený z atmosférických nosičů

Za normálních poměrů bývá plyn i bez vnějších působení nepatrně ionizován (např. přirozenou radioaktivitou, paprsky, kouřem, zplodinami hoření, plamenem a podobně). Rovněž účinkem srážek s ostatními molekulami bývá velmi malá část molekul již rozštěpena (ionizována). Přiložíme-li na elektrody elektrické napětí, stoupá proud s napětím až k určité mezní hodnotě, při níž všechny ionty nacházející se a vznikající v jiskřišti se zúčastní vedení proudu. Nastává stav nasycení, kdy již další zvyšování napětí (do určité hodnoty) vodivost plynu nemění.

Přestane-li se na plyn působit, spojují se kladné ionty opět se zápornými v neutrální molekuly a vodivost plynu zaniká. Tento jev se například využívá v ionizačních snímačích hoření.

b) Koróna

V úzkých prostorách kolem elektrod a hrotů je elektrické pole značně nehomogenní. Dochází zde k vysoké intenzitě elektrického pole, jež závisí na poloměru vodiče a na vzdálenosti k vodiči protilehlém. V těchto místech nastává nárazová ionizace, způsobující korónu. Koróna se projevuje září kolem vodiče.

c) Lavina, prsk, pramínek, sršení, trsový výboj

Jedná se o různé stupně částečného výboje. Vznikají zejména v nehomogenním poli.

d) Jiskra

Jedná se o krátkodobý intenzivní a praskavý výboj klenoucí se přes celou elektrodovou vzdálenost jiskřiště. Vysílá světelné a ultrafialové záření. Je spojena s poklesem napětí na jiskřišti. Do určité míry lze jiskru považovat za počáteční stádium oblouku. Při jiskře vzniká rovněž termické plazma jako při oblouku, trvá však velmi krátkou dobu. [2]

2.3. Vliv tlaku a poskokové vzdálenosti na přeskokové napětí

Za normálních poměrů je střední volná dráha molekul velmi malá. Aby iont obdržel na tak krátké dráze dostatečnou energii pro ionizaci nárazem, je nutno přiložit mezi elektrody značné elektrické napětí. Zředíme-li plyn, volná dráha se zvětší a na iont působí elektrické pole po delší dráze a na ionizaci stačí menší napěťový spád. Elektrická pevnost plynu zprvu s poklesem tlaku silně klesá. K jejímu vzestupu dochází až u velmi zředěných plynů. Dle Paschenova zákona napětí jiskry se nemění, změníme-li současně tlak m -krát a vzdálenost elektrod $1/m$ krát.

$$U_j = f(p \cdot e_V)$$

U_j – jmenovité přeskokové napětí

p – tlak plynu

e_V – elektrodová vzdálenost

Součin ($p \cdot e_V$) je úměrný počtu molekul plynu v prostoru mezery na 1 cm^2 . Při provozu vysokonapěťových leteckých svíček při větších nadmořských výškách dochází následkem poklesu elektrické pevnosti vzduchu k povrchovým přeskokům po izolátoru zapalovací svíčky a mezi jednotlivými částmi zapalovacího systému. Snížení provozního napětí zapalovací svíčky zmenšením doskokové vzdálenosti má své omezení dané zapalovací schopností jiskry a opalem elektrod. Proto je nutné zvětšovat povrchové cesty po izolátoru zapalovací svíčky. Prodloužení přeskokové dráhy po izolátoru má smysl pouze do určité délky, neboť ve vzduchové vrstvě při vysokých výškách dochází k doutnavému výboji. [2]

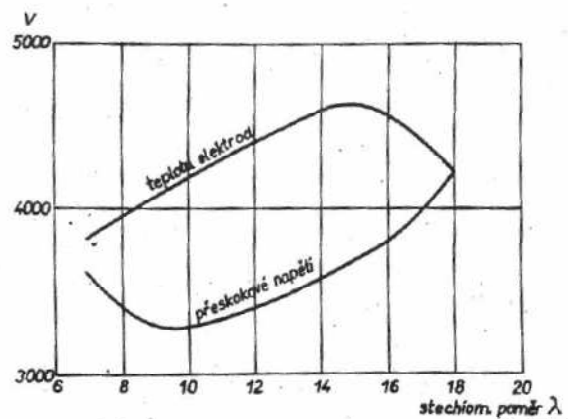
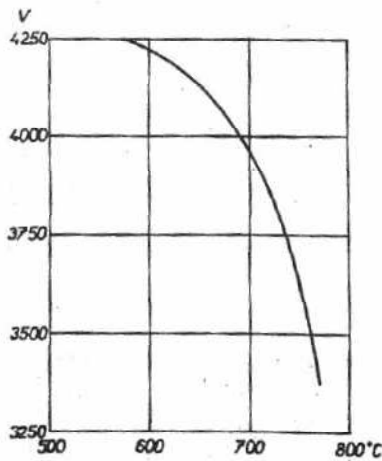
2.4. Jiskřiště zapalovací svíčky a jeho přeskokové napětí

Jiskřiště zapalovací svíčky je speciálním druhem elektrického jiskřiště s malou elektrodovou vzdáleností. Teorie jiskřiště o malé elektrodové vzdálenosti není proti běžně se vyskytujícímu takzvanému dlouhým jiskřištěm dosud dostatečně propracována. U malých jiskřišť nevychází pravděpodobně jiskra z povrchu elektrod, ale od určité vzdálenosti od nich. Možnost existence počátečních iontů v požadovaném okamžiku je u nich zmenšena. Proto platí teoretické vztahy pouze přibližně. Rovněž hodnoty, zjištěné experimentálně, se mění v širokém rozsahu, neboť přeskokové napětí je

ovlivněno různými provozními podmínkami a výrobními tolerancemi zapalovacích svíček.

a) Vliv zvýšení tlaku a teploty na přeskokové napětí svíčky

Elektrická pevnost plynu je určena jeho hustotou. Pokud se hustota plynu nemění, nemá zvýšení tlaku při současném zvýšení teploty vliv na přeskokové napětí. Závislost přeskokového napětí na změnách teploty a tlaku je znázorněna na obr. 5 a 6. V blízkosti elektrody dochází k hoření tenké vrstvy plynu na teplotu elektrod, ve které nastává ionizace a snížení elektrické pevnosti plynu v mezeře svíčky.



Obr.5: Vliv teploty na přeskokovém napětí [2]

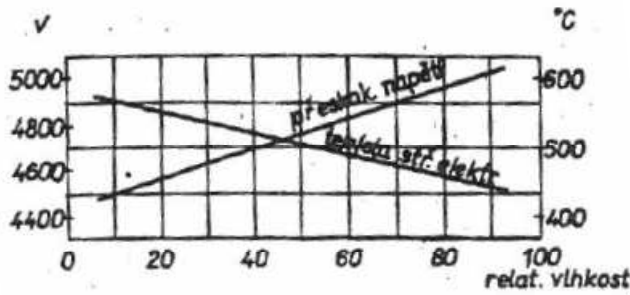
Obr.6: Vliv složení směsi na přeskokovém napětí [2]

b) Vliv složení výbušné směsi na přeskokové napětí

Při běžných provozních podmínkách je vliv zanedbatelný. K malému zvýšení přeskokového napětí dochází při přílišném ochuzení nebo obohacení směsi (obr. 6).

c) Vliv vlhkosti na přeskokové napětí svíčky

Je poměr malý (obr. 2). Vlhkost ovlivňuje více rychlost hoření.



Obr.7: Vliv vlhkosti na přeskokové napětí [2]

d) Vliv polarity elektrod

Uvažujeme-li hrot proti desce, dochází k přeskoku při nižším napětí u kladného hrotu a záporné elektrody. Konstrukce různých typů zapalovacích svíček jsou natolik odlišné, že jedny typy mají nižší přeskokové napětí za studena při kladné, druhé při záporné střední elektrodě. Vzhledem k tomu, že zapalovací svíčky musí být schopny funkce při obou polaritách (např. u magnet), nelze těchto vlastností konstrukčně využít.

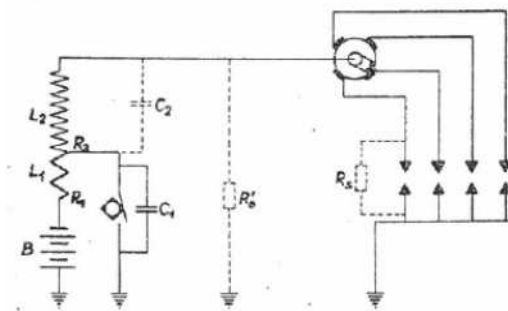
e) Vliv materiálu elektrod

Při normálních provozních podmínkách za studena nemá materiál elektrod podstatnější vliv na přeskokové napětí. Někdy se do elektrodového kovu přidává malé množství kovu Ba nebo Cs za účelem snížení rozptylu hodnoty přeskokového napětí svíčky. Tyto materiály umožňují lepší emisi při teplotách nad 500 °C. [2]

2.5. Zapalovací svíčka ve spojení se zapalovacím systémem

Na obr. 8 je schéma bateriového vysokonapěťového systému. Sepnou-li kontakty přerušovače v primárním obvodu, stoupá primární proud dle vztahu:

$$i = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \right)$$



Obr.8: Schéma bateriové zapalování [2]

i – primární proud [A]

I_0 – klidový proud [A]

R_1 – ohmický odpor primárního obvodu [Ω]

L_1 – indukčnost primárního vnutí indukční cívky [H]

t – čas měřený od sepnutí kontaktů [s]

Rozepnou-li kontakty, dochází k přechodovému jevu, při kterém nastávají oscilace primárního a sekundárního obvodu. Dle velikosti svodového odporu v sekundárním obvodu je průběh v sekundách buď oscilační tlumený, aperiodický nebo tlumený. Maximální výchylka tohoto průběhu je dána vztahem:

$$U_{2max} = i \cdot \frac{z_2}{K \cdot z_1} \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1 + C_2 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2}} \cdot e^{-\frac{\arctg \sqrt{\frac{4R^2C}{L_1} - 1}}{\sqrt{\frac{4R^2C}{L_1} - 1}}}$$

U_{2max} – maximální výchylka napětí [V]

i – primární proud [A]

z_1 – počet primárních závitů

z_2 – počet sekundárních závitů

K – koeficient vazby mezi závitů (0,85 – 0,9)

L_1 – indukčnost primárního vnutí indukční cívky [H]

C_1 – kapacita primárního kondenzátoru (0,37 [μ F])

C_2 – rozptylová kapacita sekundárního obvodu (45 - 60 [pF])

C – celková kapacita zapalovacího systému přepočtená na primár [μ F]

$$C = C_1 + C_2 \cdot \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2$$

R – celkový zatěžovací odpor zapalovacího systému přepočtený na primár [Ω]

$$R = \frac{R_z \cdot R_{\xi}}{R_z + R_{\xi}} \cdot \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2$$

R_z – ztrátový odpor, jehož hodnotu u cívek s neuzavřeným magnetickým obvodem bývá $(1,5 - 2) \cdot 10^6$ [Ω]

R_{ξ} – svodový odpor sekundárního obvodu u svíčky (obvykle bývá řádu M Ω , při zakarbonované svíčke klesá a stává se příčinou vynechávání a pálení zapalovací svíčky)

Tento vzorec se používá pro praktický výpočet. Byly v něm vypuštěny faktory, které lze v praxi zanedbat. Vzorec charakterizuje křivku, podle které vzrůstá napětí v okamžiku přerušení primárního proudu.

Uvedené vztahy byly ověřovány laboratorním měřením zapalovacího systému na motocyklu Jawa 250 zatěžováním sekundárního obvodu svodovým odporem a kapacitou. [2]

2.6. Nároky kladené na zapalovací svíčku

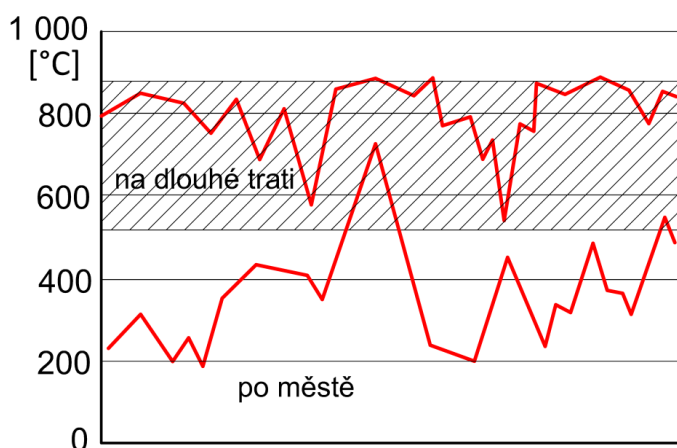
Chceme-li, aby byl provoz motoru plynulý, rychlý a ekologický, je nutné splnit několik požadavků. Ve válci musí být správný poměr směsi paliva a vzduchu a mezi elektrodami musí v předem stanoveném čase přeskočit vysokoenergetická zapalovací jiskra. Proto musí zapalovací svíčky splňovat ty nejpřísnější požadavky na funkčnost. Musí generovat energeticky bohatou jiskru zhruba 500 - 3 500× za minutu (při 4-válcovém chodu), a to i během několikahodinové jízdy ve vysokých otáčkách nebo v popojíždějí dopravě. Spolehlivé zapalování musí být zajištěno i při teplotách kolem -20 °C. Špičkové zapalovací svíčky nabízejí nízkoemisní spalování a optimální výhřevnost paliva. Nedochozí k poruchám zapalování, kvůli kterým se může nespálené palivo dostat do katalyzátoru a nevratně ho zničit. Moderní zapalovací svíčka musí splňovat následující požadavky: [2]

- 1) Požadavky na elektřinu – a) spolehlivý přenos vysokého napětí i při zapalovacím napětí kolem 40 000 V
b) dobrá izolační schopnost i při teplotách okolo 1 000 °C, ochrana před jiskřením a výboji
- 2) Tepelné požadavky – a) odolnost vůči tepelným rázům (horké výfukové plyny – sání studeného vzduchu)
b) činná část izolátoru s dobrou tepelnou vodivostí včetně elektrod
- 3) Mechanické požadavky – a) tlakové a vzduchové utěsnění spalovací komory, odolnost vůči oscilujícím tlakům do cca 100 bar
b) vysoká mechanická pevnost pro spolehlivou montáž
- 4) Elektromechanické požadavky – a) odolnost vůči opálení kontaktů, spalinám a zbytků hoření
b) prevence tvorby usazenin na izolátoru

Při konstruování nového typu motoru (v tomto případě zážehového) se musejí vzít v úvahu i parametry pro zapalovací svíčku. Konstruktor motoru musí brát v potaz následující body:

- 1) při použití některých z běžně vyráběných řad zapalovacích svíček se musí uvažovat její dané rozměry a tepelné charakteristiky, a nebo lze uvažovat o vývoji nového typu
- 2) při požadavku na novou zapalovací svíčku je nutné uvést následující parametry:
 - a) základní rozměry, respektive u leteckých motorů váhu
 - b) předpokládanou charakteristiku motoru, a to typ, kompresní poměr, otáčky, specifický výkon, chlazení, předpokládané umístění zapalovací svíčky, časování ventilů
 - c) druh zapalovacího systému (jeho charakteristika), směšovací poměr paliva a vzduchu
 - d) druh použitého paliva
 - e) popřípadě další speciální požadavky

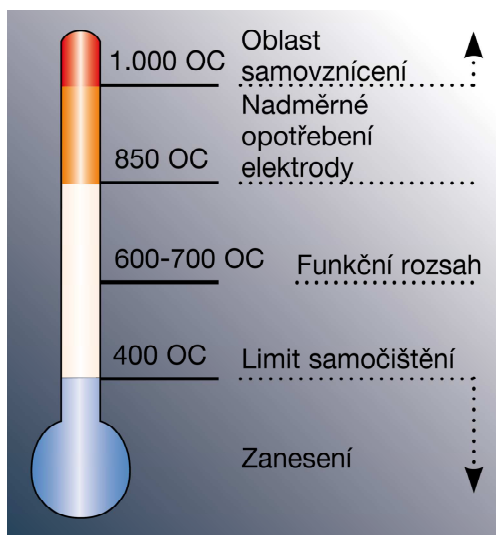
Na zapalovací svíčku jsou stále kladeny vysoké nároky, a to zejména zvyšováním litrového výkonu motoru a používání paliv s podílem etanolu. Zapalovací svíčka zasahuje svojí spodní částí, přesněji řečeno vnitřní a čelní stranou závitového čepu, elektrodami a špičkou izolátoru (tak zvaně činná část) přímo do spalovacího prostoru, kde je vystavena řadě nepříznivých vlivů popsaných výše. Během vlastního provozu se teploty činné části svíčky značně mění. Obr. 9 ukazuje průběh teplot zapalovací svíčky během sledovaného provozu. [2]



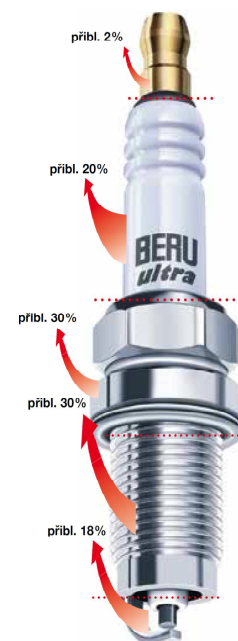
Obr.9: Průběh teplot zapalovací svíčky [2]

2.7. Tepelná hodnota a vedení tepla

Při studených startech, volnoběžných otáčkách a při teplotách činné části zapalovací svíčky pod 400 °C (obr. 10) dochází vlivem nedokonalého spalování k nánosům sazí a karbonu na špičce izolátoru. Dojde-li potom ke zvýšení teplot (při zatížení teplého motoru), uhlík se spaluje a dochází k tzv. samočisticímu procesu špičky izolátoru za předpokladu, že je pro daný motor volena správná zapalovací svíčka. Při této správné volbě nedochází při maximálním tepelném namáhání motoru k vyšší teplotě činné části zapalovací svíčky nežli 850 °C a nedochází k samozápalu od rozžhavených částí zapalovací svíčky.



Obr.10: Teplotní meze samočisticího procesu zapalovací svíčky [1]



Obr.11: Dráha odvodu tepla zapalovací svíčkou [1]

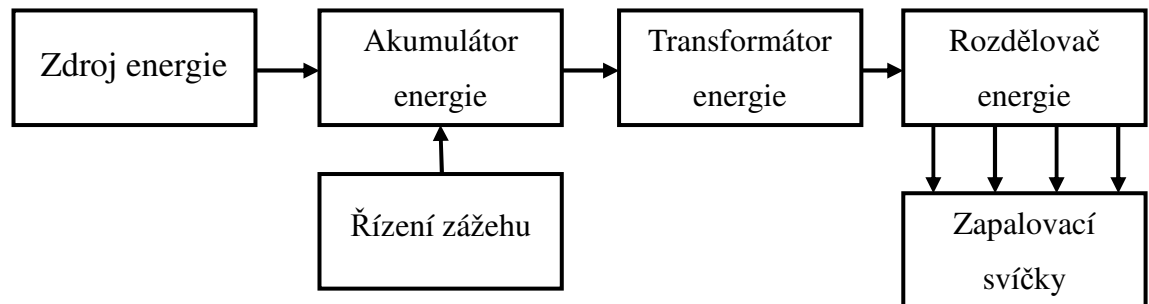
Čím vyšší je výkon motoru, tím vyšší je většinou také teplota ve spalovací komoře. Velikost činné části izolátoru hraje klíčovou roli při absorpci tepla. Teplo se odvádí ze špičky izolátoru do hlavy válce přes středovou elektrodu a vnitřní těsnění v tělese svíčky. Zapalovací svíčky s dlouhou činnou částí izolátoru absorbují více tepla. Avšak vzhledem k dlouhé cestě k tělesu svíčky odevzdávají méně tepla, jsou proto označovány jako teplé svíčky. Zapalovací svíčky s krátkou činnou částí izolátoru absorbují méně tepla. Avšak vzhledem ke krátké cestě k tělesu svíčky odevzdávají více tepla, jsou označovány jako studené zapalovací svíčky.

Při spalovacím procesu ve válci krátkodobě vzrůstá teplota až na 3 000 °C a při

této teplotě může rovněž docházet k ohřevu vlastní zapalovací svíčky. Prostřednictvím různých cest odvodu tepla (obr. 11) odevzdávají zapalovací svíčky asi 80% absorbovaného tepla vedením. Převážná většina tohoto tepla se přenáší závitem svíčky přímo do hlavy válce. Zapalovací svíčky je tedy potřeba vždy utáhnout na správný utahovací moment. Pouze 20% tepla odebírá a odvádí směs paliva a vzduchu, která proudí kolem svíčky. Využitím kompozitních elektrod, např. niklových elektrod s měděným jádrem, se dá dosáhnout výrazně účinnějšího vedení tepla. Je-li poloha jiskry ve spalovací komoře extrémně vysunutá, lze rychle dosáhnout samočisticí schopnosti (díky specifické poloze činné části izolátoru absorbujícího teplo) a horní maximální limit teploty na izolátoru se drží pod 900 °C. Tento typ zapalovacích svíček je tedy vhodný pro vysoce i méně tepelně zatížené motory. [2]

3. Základní rozdělení zapalovacích systémů

Jak už bylo řečeno v úvodu, existuje několik základních typů zapalovacích systémů, které se od sebe liší jak konstrukcí, tak i z pohledu spolehlivosti či efektivity zapalování. Typy zapalování se dají rozdělit podle několika kritérií, ale zapalování jako celek se vždy skládá ze zdroje energie, spínače, indukční cívky transformující energii na vysoké napětí, rozdělovače a zapalovacích svíček (viz obr. 12).



Obr.12: Zapalovací schéma

Úkolem zapalování je zapalovat elektrickou jiskrou směs paliva se vzduchem ve spalovacím prostoru motoru. Okamžik zážehu je vázán na polohu pístu před horní úvratí (natočení klikového hřídele), čemuž se říká předstih zážehu a mění se s otáčkami motoru. Samotný předstih zážehu se dále musí přizpůsobovat řadě provozních podmínek, jako například zatížení motoru, bohatosti směsi, zamezení detonačnímu spalování atd.

Základní rozdělení zapalovacích systémů:

Magnetové – kontaktní

– bezkontaktní

Bateriové – kontaktní – klasické

– tranzistorové

– tyristorové

– elektronické

– bezkontaktní – tranzistorové

– tyristorové

– plně elektronické

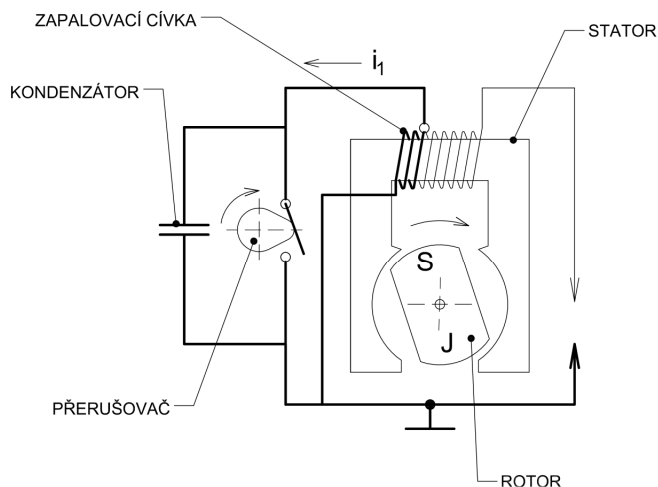
Piezoelektrické, Vysokofrekvenční, Laserové

4. Magnetové zapalování

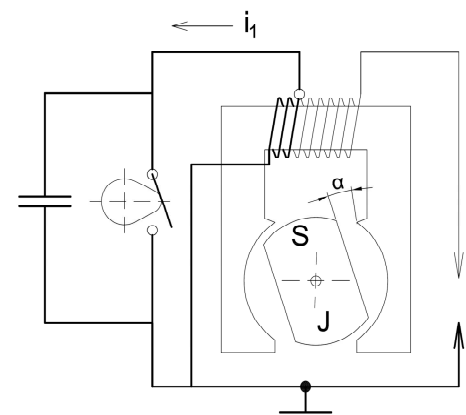
4.1. Magnetové kontaktní zapalování

Jedním z prvních elektrických zapalovacích systémů pro zážehové motory bylo magnetové kontaktní zapalování. Magnetové zapalování funguje na principu elektromagnetické indukce, kdy rotor osazený permanentním magnetem rotuje kolem pevné cívky statoru, která může být současně i zapalovací. Rotor je poháněn z klikové hřídele.

Otáčením permanentního magnetu se mění velikost i směr magnetického toku v magnetickém obvodu statoru (vzniká střídavý magnetický tok), od kterého se ve vinutí zapalovací cívky indukují napětí. Napětí není ale dostatečně velké, aby mohla přeskočit jiskra na zapalovací svíčke. Toto napětí způsobí, že primárním vinutím teče proud i_1 (viz obr. 13). Tento proud způsobí, že v primárním vinutí se akumuluje magnetická energie. Po přerušení proudu kontaktem se v primární cívce magnetická energie rychle ztrácí a v sekundární cívce se indukují vysoké napětí.



Obr.13: Schéma magnetového kontaktního zapalování



Obr.14: Schéma kontaktního magneta s vyznačením odtrhu α

Jelikož se počítá magnetický tok permanentního magnetu na rotoru a magnetický tok, který vytváří cívka statoru, mělo by rozeptnutí kontaktů přerušovače nastat v okamžiku, kdy při přerušení proudu dojde k největší změně magnetického toku. Vlivem odporu vinutí nejsou optimální polohy sepnutí ani rozeptnutí stejné v celém rozsahu otáček. Seřízení přerušovače se provádí na základě optimálního výkonu při

malých nebo velkých otáčkách. Většinou je přerušovač nastaven na optimální výkon při malých provozních otáčkách, protože při vyšších otáčkách bývá energie dostatek. Ovšem nemusí to pro každé zapalovací magneto a provozní podmínky platit. K potřebnému přeskoku jiskry na zapalovací cívce dojde v okamžiku rozpojení kontaktů přerušovače. Konstrukční řešení vačky je většinou řešeno umístěním přímo na jednom hřídeli s rotorem magneta tak, aby k rozpojení kontaktů došlo těsně po oddálení pólových nástavců, kdy má magnetické pole největší energii.

Aby bylo možno tuto polohu snadno a bez nákladných měřicích zařízení vizuálně kontrolována, používá se takzvaného magnetického odtrhu α , který je patrný z obr. 14. Jedná se vlastně o vzdálenost mezi jednou pevnou hranou statoru a jednou otáčející se hranou rotoru vyjádřenou ve stupních. Toto konstrukční řešení, kdy je vačka přerušovače na stejném hřídeli jako rotor magneta, ztěžuje možnost regulovat předstih zážehu pouhým natáčením vačky nebo přerušovače jako u bateriového zapalování. Jen u magnet s dostatečným přebytkem výkonu lze omezeně regulovat předstih zážehu, protože odchylky od optimální polohy znamenají vždy zmenšení výkonu magneta. Aniž by byl ovlivněn výkon magneta, je možnost seřídit předstih zážehu otočením celé soustavy magneta. Jestliže je magnetové zapalování vybaveno odstředivým regulátorem, musí být jeho konstrukce podstatně robustnější, protože musí přenášet větší momenty setrvačnosti. Během otáčky se mění kromě toho směr sil magnetického pole působících na rotor a zvláště při menších otáčkách mohou vznikat vibrace a rázy v pohonu.

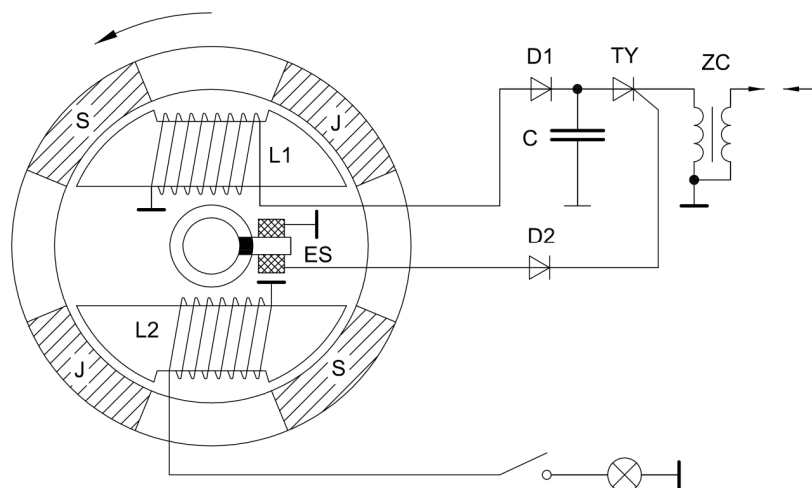
Konstrukčně existují tři základní typy magnetového zapalování:

1. S rotujícím permanentním magnetem a stojící cívkou – nejběžnější typ, který se nejvíce používá jako setrvačnickové magneto u jednostopých motorových vozidel. Setrvačnickové magneto je konstruováno tak, aby jeho točivé části měly co největší moment setrvačnosti a tím přispívaly k rovnoměrnosti chodu motoru.
2. S rotujícím magnetickým můstkem a se stojícím permanentním magnetem i cívkou – použití u více válcových leteckých motorů
3. S rotující cívkou a pevným permanentním magnetem – tento typ se už nepoužívá pro složitost konstrukce, kde se otáčel přerušovač i s kondenzátorem

4.2. Magnetové bezkontaktní zapalování

Magnetové bezkontaktní zapalování se odborně označuje zkratkou CDI (zkratka z „Capacitive Discharge Ignitor“ - zapalování s vybíjecím kondenzátorem). Existuje i magnetové bezkontaktní zapalování s akumulátorovým napájením (DC-CDI). Stejně jako magnetové kontaktní zapalování se skládá s rotujícího permanentního magnetu a stojící cívky, která je i zde zdrojem energie. Rozdílem je, že neobsahuje mechanický přerušovač (vačku), ale bezkontaktní spínač tyristor. Existují dva typy magnetového bezkontaktního zapalování lišící se pouze zapojením cívek statoru a aktivací tyristoru.

První variantou je bezkontaktní kondenzátorové (tyristorové) magnetové zapalování s elektronickým snímačem (viz obr. 15), jehož princip je následující. Ve vinutí L1 se indukuje napětí díky rotujícím permanentním magnetům, které nabíjí kondenzátor C (cca 300 V) přes diodu D1. Kondenzátor C se vybíjí do primárního vinutí zapalovací cívky ZC, která je umístěná mimo vlastní magneto, přes tyristor TY a ze které je vysoké napětí vedeno přímo k zapalovací svíčke. K aktivaci tyristoru TY dochází prostřednictvím elektromagnetického snímače ES, který elektrické napětí vede do diody D2 a ta ho následně propouští do spínací elektrody tyristoru TY. Vinutí L slouží k napájení ostatních spotřebičů vozidla.



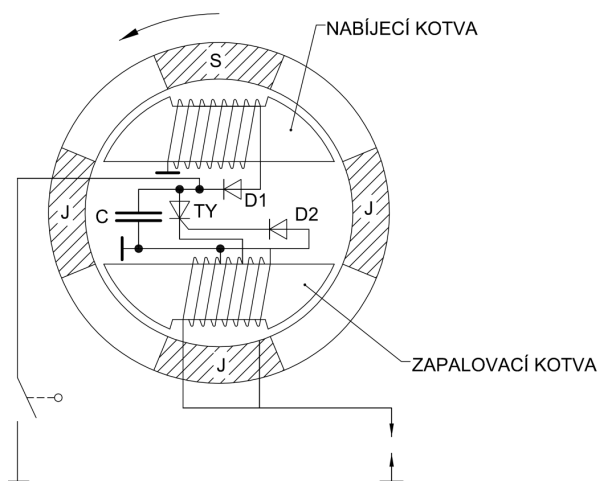
Obr.15: Bezkontaktní kondenzátorové (tyristorové) magnetové zapalování s elektronickým snímačem

Druhou variantou je bezkontaktní kondenzátorové (tyristorové) magnetové zapalování (viz obr. 16). Princip je velice podobný jako u předchozího zapalování. Při otáčení rotoru s asymetricky rozmístěnými permanentními magnety se v nabíjecí kotvě

indukuje střídavý elektrický proud, který je usměřňován diodou D1 do kondenzátoru C. V kondenzátoru C se hromadí elektrická energie potřebná k přeskoku elektrické jiskry na zapalovací svíčke. Tyristor TY je uzavřen a elektrický náboj nemůže přes diodu D1 odtékat. K aktivaci tyristoru TY dochází při pootočení rotoru, kdy se severní pól magnetu dostává k zapalovací kotvě, ve které dojde k změně směru magnetického toku. V zapalovací kotvě dojde touto změnou k napěťovému impulzu opačného směru. V tento moment dioda D2 propustí kladnou půlvlnu elektrického napětí z primárního vinutí na spínací elektrodu tyristoru TY, který se otevře a propojí nabitý kondenzátor C s opačným (neukostřeným) koncem vinutí primární cívky. Při sepnutí tyristoru, kdy dojde k přeskoku jiskry na zapalovací svíčke, dochází k silnému proudovému nárazu při vybíjení elektrického náboje kondenzátoru přes primární cívku na statoru. To způsobí v primárním i sekundárním vinutí zapalovací kotvy velmi razantní nárůst elektromagnetické indukce. Tím se zvýší napětí na středové elektrodě zapalovací svíčky, které je velmi strmé a přispívá k samočisticí schopnosti zapalovací svíčky.

Předstih zážehu je založen na principu, že spínací tyristor má vždy stejné spínací napětí. Když se zvyšují otáčky rotoru, tak se zvyšuje i indukované napětí rychleji, a proto se indukuje dříve i spínací napětí. Tím se automaticky zvyšuje předstih zážehu.

Obecně je magnetické bezkontaktní zapalování (CDI) jedno z nejjednodušších a nejspolehlivějších zapalování vůbec. Výhodou je absolutní nezávislost na jakémkoliv přídatném zdroji energie. Údržba se stává prakticky jenom v ochraně před vniknutím vody a nečistot. Vlastní elektrické spínače jsou neopravitelné a dají se pouze vyměnit. Použití je především u malých spalovacích motorů, jako jsou motorové pily, sekačky, mopedy, malé motocykly a u leteckých pístových motorů, protože je spolehlivější než bateriové zapalování.



Obr.16: Bezkontaktní kondenzátorové (tyristorové) magnetové zapalování pro jednoválcový motor

5. Bateriové zapalování

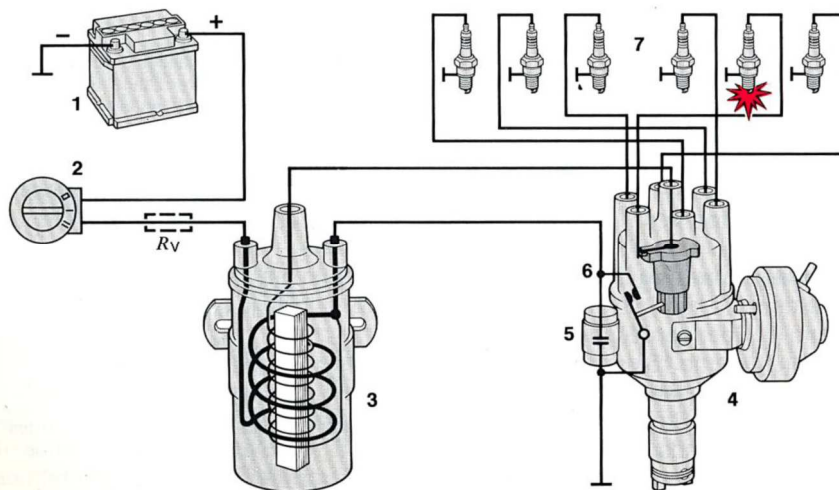
Před a zejména po druhé světové válce se začaly do automobilů a motocyklů instalovat akumulátory elektrické energie. Bylo to zejména tím, že bylo třeba vozidlo mít osvětlené, i když zrovna nebyl spuštěn spalovací motor, a potřeba startování vozidla bez nutnosti roztáčet motor ručně za pomoci kliky. Tím se do popředí dostalo bateriové zapalování před magnetovým zapalováním. Bateriové zapalování je rozšířeno hlavně u starších vozidel a dnes ho nahrazuje elektronické zapalování, které je mnohem variabilnější a které do řízení zahrnuje mnoho dalších hodnot.

5.1. Bateriové kontaktní zapalování

Prvním a nejjednodušším systémem bateriového kontaktního zapalování je klasické - obr. 17. Od magnetového zapalování se odlišuje zejména zdrojem externí energie v podobě akumulátoru, který je dobíjen alternátorem či dynamem a mechanickým rozdělovačem.

5.1.1. Složení bateriového kontaktního zapalování

Pro snadnější pochopení je třeba si rozdělit bateriové zapalování na dvě hlavní části, kterými jsou primární a sekundární vedení. Primární vedení tvoří akumulátor, spínací skříňka, zapalovací cívka a její primární vinutí, přerušovač, kondenzátor, propojovací elektrické vodiče včetně svorek a kontaktů. Sekundární vedení je tvořeno zapalovací cívkou a jejím primárním a sekundárním vinutím, vysokonapěťovými (zapalovacími) kabely včetně koncovek, rozdělovačem a zapalovacími svíčkami.



Obr.17: Schéma klasického bateriového zapalování: [3]

1 – akumulátor, 2 – spínací skříňka, 3 – zapalovací cívka, 4 – rozdělovač, 5 – kondenzátor, 6 – přerušovač, 7 – zapalovací svíčky, R_v – předřadný odpor

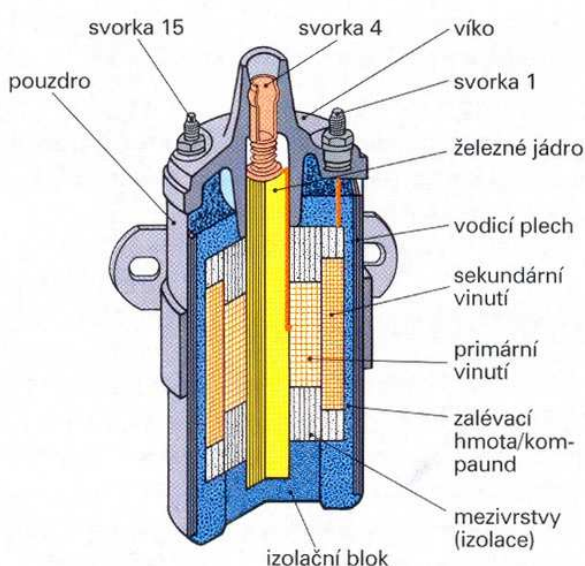
K zvýšení elektrického napětí (cca o 8 000 až 24 000 V) z akumulátoru (12 V) slouží zapalovací cívka (obr. 18) v součinnosti s přerušovačem a kondenzátorem. Jádro cívky je tvořené transformátorovými ocelovými plechy, na kterých je navinuta sekundární cívka z měděného drátu (\varnothing 0,05-0,1 mm) s cca 40 000 závitů. Primární cívka z měděného drátu (\varnothing 0,6-0,9 mm) s asi 350 až 600 závitů je navinuta na sekundární cívce. Jádro i cívky musejí být elektricky izolovány mezivrstvou izolace a vše je umístěno v keramickém izolačním bloku. Vnější pouzdro je hliníkové a po obvodu je vyplněno magneticky vodivými plechy. Pro dobré chlazení je zbývající prostor vyplněn asfaltovou zalévací hmotou (asfalt + dehet). Horní část cívky je opatřena víkem z izolačního materiálu (reaktoplastu), kde je na svorku 15 (obr. 18) připojen začátek primární cívky a její konec na svorku 1. Začátek sekundární cívky je připojen buď ke svorce 15, nebo k svorce 1 (zapojení neovlivňuje funkci zapalování), její konec je vyveden na svorku 4. Primární vinutí využívá podobného úsporného zapojení (jako tzv. „autotrasformátor“) k elektromagnetické indukci a dosažení vyššího zapalovacího napětí.

Kondenzátor (14) se při rozpojování kontaktů přerušovače nabíjí a pohlcuje elektrický náboj, který by způsobil značné jiskření a opalování kontaktů, přičemž se až 20× urychlí přerušování elektrického proudu. Velmi rychlé zanikání magnetického pole v zapalovací cívce a velmi intenzivní indukce vysokého napětí potřebného pro zapalování je ovlivňováno velmi rychlým přerušováním elektrického proudu protékajícím

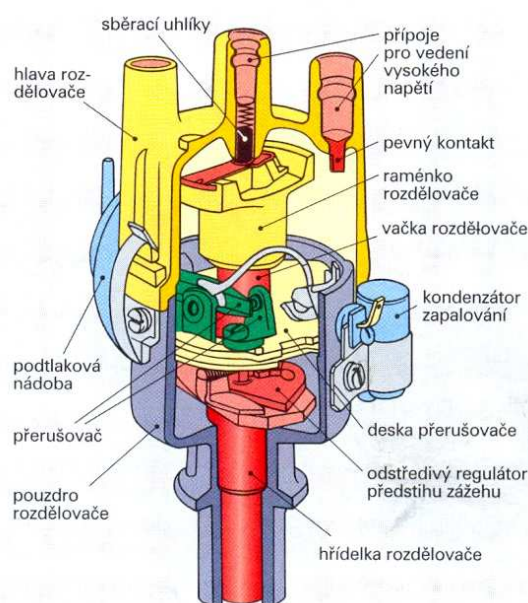
primárním vinutím.

Z hlediska podstaty činnosti indukčního získávání vysokého napětí by bylo velmi výhodné, kdyby se tento kondenzátor nemusel použít. Zvýšení napětí v sekundárním vinutí by tím následkem bylo rychlejší, stačilo by méně závitů, menší akumulovaná energie atd. Přerušovač s mechanickými kontakty, který by obvod přerušil bez velkých energetických ztrát, nebyl doposud zcela vyřešen. Kondenzátor musí být zapojen paralelně ke kontaktům, protože jinak by docházelo i u poměrně malého indukovaného napětí při malé vzdálenosti kontaktů na začátku zdvihu mezi nimi k velkému gradientu napětí v mezeře a vzniku výboje. Následně by se při dalším vzdalování kontaktů oblouk jen prodloužil a nezhasl, dokud by se v něm nespotebovala téměř celá energie akumulovaná do magnetického pole zapalovací cívky. Elektrické napětí na sekundární straně by bylo malé a jiskra na svíčke by nemohla přeskočit.

Kapacita kondenzátoru má být co nejmenší, ale na druhou stranu dostatečně velká, aby se napětí na kontaktech zvyšovalo jen tak rychle, aby při vzdalování kontaktů bylo pro každou vzdálenost menší než napětí průrazné. Kondenzátor je vyroben jako svitek 2 hliníkových folií (elektrod) navzájem izolovaných kondenzátorovým papírem, jenž je napuštěný silikonovým olejem. Jedna z elektrod je spojená s kovovým obalem kondenzátoru a prostřednictvím ukostření je propojená s pevným kontaktem přerušovače. Druhá elektroda je prostřednictvím elektrických vodičů připojená k pružině kontaktu pohyblivého raménka přerušovače.



Obr.18: Zapalovací cívka [4]



Obr.19: Rozdělovač [4]

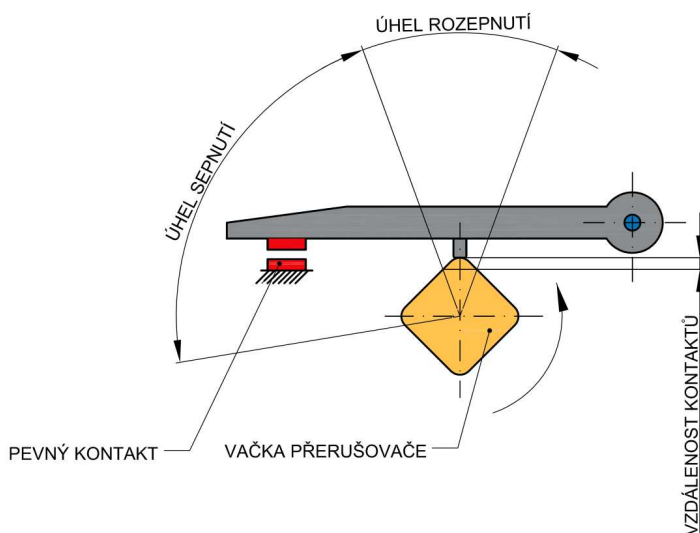
5.1.2. Činnosti bateriového kontaktního zapalování

Elektrický proud je veden z akumulátoru na svorku spínací skříňky. Při zapnutí zapalování propojí spínací skříňka vedení se svorkou 15 a kabelem je přiveden elektrický proud na svorku 15 zapalovací cívky (obr. 18). Jsou-li kontakty přerušovače spojeny, protéká elektrický proud primárním vinutím zapalovací cívky na svorku 1 a odtud na svorku 6 přerušovače (obr. 17). Elektrický proud protéká na kostru přes jeho pevný kontakt. V primárním vedení dochází vlivem průtoku elektrického proudu ke vzniku magnetického pole. Při jeho vzniku (i při každém sepnutí kontaktů) vlivem vlastní indukce (samoindukce) se indukuje v primárním vinutí napětí opačného směru. Proto brzdí (o 0,010–0,015 s) rychlý vznik magnetického pole stejného směru, jaký má elektrický proud přitékající od akumulátoru, a tím i okamžité zvýšení intenzity toku elektrického proudu. Toto zpoždění zapříčiňuje, že u bateriového zapalování za vysokých otáček klesá zapalovací napětí a tím i kvalita jiskry (čtyřválcový motor z 25 kV při 800 min⁻¹ na 10 kV při 5000 min⁻¹). Vadí to především u šesti a víceválcových motorů.

Při otáčení vačky přerušovače (obr. 20) se nadzvedne pohyblivé rameno a dojde k rozpojení kontaktů. Při rozpojení kontaktů dochází k zániku magnetického pole a svými siločarami protíná vinutí obou cívek. V primárním vinutí se indukuje elektrické napětí 300 až 400 V a elektrický proud o intenzitě 3 až 4 A, jaký má elektrický proud přitékající od akumulátoru. Paralelně ke kontaktům přerušovače je připojen kondenzátor, který asi 20× urychlí přerušování toku elektrického proudu a způsobí i stejně rychlý zánik magnetického pole. Tato velmi rychlá změna magnetického pole protíná svými siločarami vodiče obou cívek a způsobí v nich indukci vysokého zapalovacího napětí (cca 8–25 kV). Konec sekundárního vinutí zapalovací cívky (svorka č. 4 obr. 18) je vyveden vysokonapětovým kabelem přes sběrací uhlíkový kartáček (obr. 19) na otočné raménko - „palec“ rozdělovače. Z otáčejícího se kontaktu palce přeskakuje vysoké napětí mezerou (0,2–0,3 mm) na pevné kontakty v hlavici rozdělovače, které jsou propojeny vysokonapětovými kabely a jejich koncovkami k jednotlivým zapalovacím svíčkám.

Rozdělovač obsahuje také odstředivý a podtlakový regulátor předstihu. Odstředivý regulátor mění předstih zážehu v závislosti na otáčkách motoru. Při zvyšování otáček zvětšuje předstih zapalování, zpravidla až o 20 °KH. Předstih zážehu je nutné zvyšovat při vysokých otáčkách z důvodů stejné rychlosti hoření, kdy je méně

času na dokonalé prohoření směsi. Podtlakový regulátor je schopen zvýšit předstih zážehu obvykle až o 15 °KH. Většího předstihu zážehu je také potřeba u částečně otevřené škrticí klapky karburátoru, kdy je směs ochuzená a déle hoří.



Obr.20: Schéma činnosti přerušovače (vzdálenost kontaktů – odtrh = $0,4 \pm 0,05$ mm)

5.1.3. Bateriové kontaktní tranzistorové zapalování

Od klasického bateriového kontaktního zapalování se liší pouze tím, že mechanický přerušovač řídí elektrické impulzy pro tranzistorovou ovládací (spínací) jednotku. Tím bylo hlavně docíleno, že kontakty se už neopalují, jiskry jsou mohutnější, lépe zapalují i chudší směs. Ostatní části zapalování se prakticky nezměnily. Používalo se velice málo a bylo nahrazeno tranzistorovým nebo tyristorovým bezkontaktním zapalováním.

5.1.4. Bateriové kontaktní tyristorové zapalování

Někdy je také označováno za kondenzátorové zapalování. Od tranzistorového zapalování se liší tím, že elektrická energie je shromažďována především v kondenzátoru a spínání, tj. vybíjení kondenzátoru do zapalovací cívky, zajišťuje tyristor. Tím, že kondenzátor je nabitý na několik set voltů, dochází k vybíjení napětovou vlnou se strmým čelem. V důsledku toho roste rychle napětí na svíčkách, což způsobuje snížení ztrát svodem na svíčky a dobrou činností zapalování i při silně

znečištěných svíčkách. Jistá nevýhoda vzniká při vyšších otáčkách, kdy je doba mezi jednotlivými jiskrami tak krátká, že se nestačí nabíjet kondenzátor na plnou hodnotu a akumulovaná energie začíná klesat. To lze řešit za pomoci samočinné regulace konstantního napětí na vybíjecím kondenzátoru. Toto napětí je pak konstantní v celém rozsahu otáček a není závislé ani na poklesu napětí na akumulátoru. Celkově je tyristorové kontaktní zapalování poměrně složité a taktéž bylo nahrazeno bezkontaktním zapalováním.

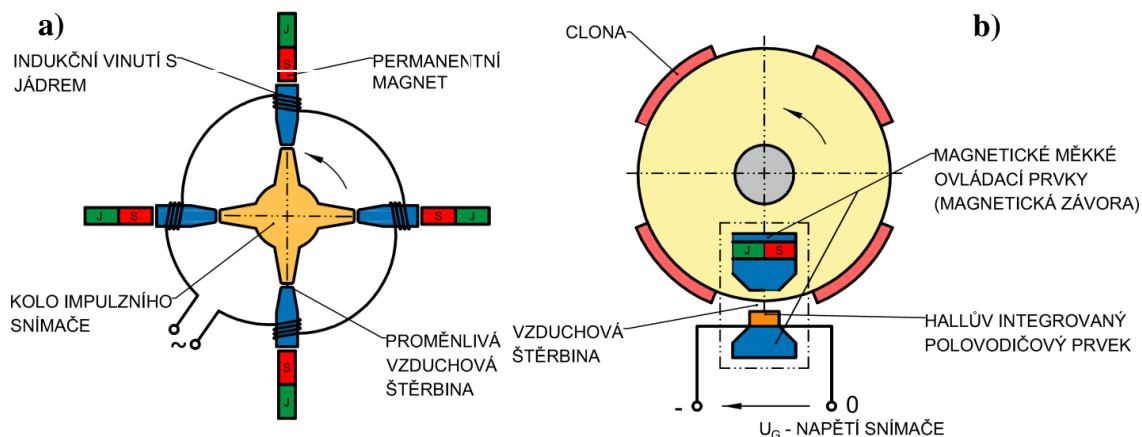
5.1.5. Bateriové kontaktní elektronické zapalování

S nástupem mikropočítačů bylo umožněno řízení předstihu zapalování elektrickou regulací. Mikropočítač pro řízení předstihu zapalování spolupracuje s řadou snímačů (otevření škrticí klapky, tlaku v sacím potrubí, teplotě motoru, teplotě nasávaného vzduchu, napětí akumulátoru, údajů z lambda sondy a popřípadě i klepání motoru). I když řízení je elektronické, stále využívá mechanického rozdělovače. Proto se nazývá ještě kontaktní. Jeho dalším vývojovým stupněm je plně elektronické zapalování.

5.2. Bateriové bezkontaktní zapalování

Tento druh zapalování se od kontaktních zapalování liší bezkontaktním snímačem v rozdělovači, jinak ostatní komponenty jsou v zásadě stejné. Bezkontaktní přerušovače jsou zařízení, která na základě impulsů uvádějí do činnosti elektrické zapalování. Nejčastěji se používají snímače indukční (obr. 21a), fotoelektrické, oscilátorové a snímače na principu Hallova jevu (obr. 21b). U zavádění bezkontaktních přerušovačů byly zpočátku používány klasické rozdělovače, ale místo mechanického přerušovače s vačkou byl umístěn bezkontaktní snímač. Z provozního hlediska jsou nejvýhodnější snímače fotoelektrické, oscilátorové a také snímače s Hallovo sondou, u nichž amplituda signálu nezávisí na otáčkách motoru. To je výhodné zejména při spouštěcích otáčkách, kdy indukční snímače mají amplitudu impulsu závislou na otáčkách motoru, nejsou tedy schopny dávat impulsy s dostatečně velkou amplitudou. Proto z tohoto důvodu musí být elektromagnetické snímače navrženy a upraveny tak, aby i při startovacích otáčkách dávaly impulsy s dostatečnou amplitudou. Bezkontaktním zapalováním se též odstranily nedostatky kontaktního zapalování.

Bateriové bezkontaktní zapalování může být, tak jako v předchozím případě bateriového kontaktního zapalování, tranzistorové (označováno TCI – zkratka z „Transistor Controlled Ignition“), či tyristorové. Jedinou změnou je tedy nahrazení mechanického rozdělovače bezkontaktním snímačem. Stále ovšem používá odstředivý a podtlakový regulátor předstihu. V Československu se tento systém začal používat u automobilů Škoda Favorit. Použití je zejména u starších vozů s karburátorem, ale i u motorů se vstřikováním a katalyzátorem.



Obr.21: Schéma snímačů a) – indukčního, b) Hallova snímače

5.2.1. Bateriové bezkontaktní elektronické zapalování

Od elektronického kontaktního zapalování se především liší v chybějícím mechanickém rozdělovači, neobsahuje tedy žádné rotující díly. Tím přispívá k omezení elektromagnetického rušení, ztrát napětí a proudu jiskřením v rozdělovači. Plně elektronický systém je již zcela propojen se vstřikováním paliva díky elektronické řídicí jednotce, která obsahuje mikropočítač. Spolehlivost a technické parametry jsou mnohem lepší než u kontaktního elektronického zapalování, a to především díky vyšší energii jiskry a lepšímu řízení předstihu zážehu.

V nejjednodušším a nejstarším provedení používá dvě dvoujiskrové zapalovací cívky. Každé cívce jsou přiřazeny dva válce motoru. Na každé otočení klikové hřídele připadá jeden přeskok jiskry, což znamená, že jedna jiskra spadá do fáze výfuku. U motorů s lichým počtem válců a zejména u moderních motorů má řídicí jednotka pro každý válec samostatnou jednojiskrovou zapalovací cívku. Rozváděno je v tomto případě poměrně nízké napětí 400 V k zapalovacím cívkám, které jsou nasunuty přímo na zapalovací svíčky. Velkou výhodou tohoto konstrukčního řešení je absence

vysokonapěťových kabelů a snazší a dokonalejší elektromagnetické odrušení.

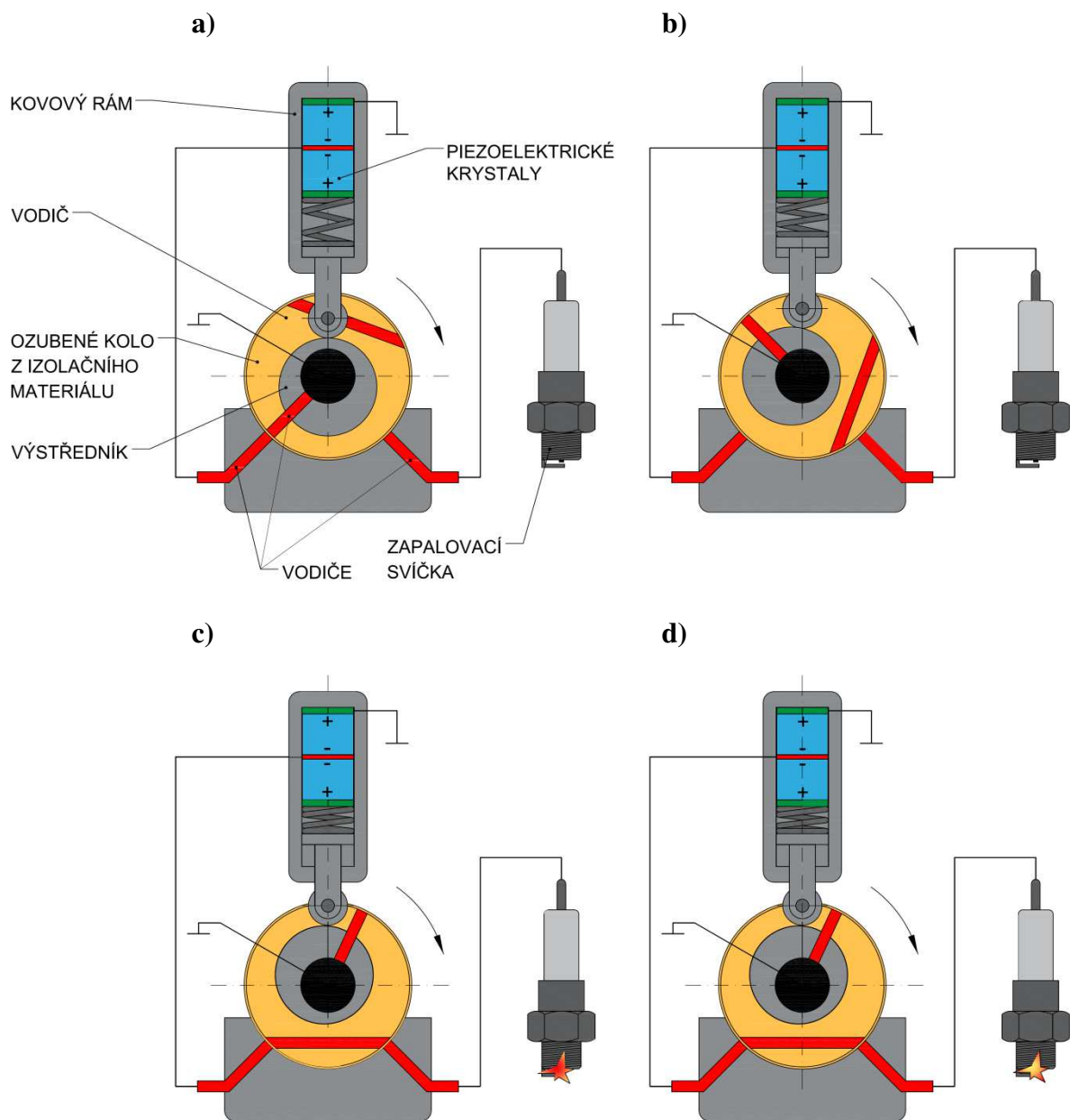
6. Piezoelektrické zapalování

Piezoelektrické zapalování se od předchozích druhů zapalování podstatně liší. K získání potřebného vysokého napětí se docíluje tlakem na piezoelektrický materiál. Využívá se tedy tzv. piezoelektrického jevu, kdy při působení tlaku na krystal (nejčastěji křemíku) dochází ke vzniku elektrického náboje.

Pro lepší představu fungování piezoelektrického zapalování bude k vysvětlení použit obr. 22. Na obr. 22a) jsou dva piezoelektrické krystaly vloženy do rámu tak, aby se záporný náboj soustředil na koncích a kladný mezi vodičem. Vodič je následně veden až do spodního bloku rozvaděče. Krystaly jsou stlačovány pomocí pístku, kterému zajišťuje pohyb výstředník uložený přímo na klikovém hřídeli motoru. Tímto principem jsou krystaly vystaveny tlaku vždy jednou za otáčku. Kliková hřídel je na obr. 22a) v dolní úvratí, kdy je rozpojeno vedení k zapalovací svíčce. Jelikož krystaly vytvářejí napětí i při tlakovém poklesu, je třeba toto napětí uzemnit, k čemuž slouží elektricky izolované ozubené kolo, ve kterém se nachází vodivá spojení. Právě jedno z těchto vodivých spojení umožňuje v dolní úvratí spojení, které vede přes klikovou hřídel k uzemnění. Obr. 22b) ukazuje, jak výstředník směřuje do horní úvratě, přičemž stlačuje přes pístek krystaly. V krystalech se začíná hromadit napětí, ale všechna vodivá spojení jsou rozpojena. Těsně před horní úvratí (obr. 22b) se vodivá spojení v bloku propojí a nashromážděné napětí může být vedeno k zapalovací svíčce. Jak už bylo uvedeno výše, k zapalování zde dochází při každé otáčce, tudíž jedno „zapálení“ vede do fáze výfuku (obr. 22c). Předstih zážehu lze nastavit pomocí ozubeného kola bez ohledu na excentricitu výstředníku, nebo místo něj použít klasický mechanický rozdělovač.

Na samotný piezoelektrický materiál jsou také kladeny velké nároky jako například snášení velkého mechanického namáhání bez poškození, snášení průrazu při vysokém elektrickém napětí, izolační vlastnosti k udržení elektrického náboje, účinnost přeměny mechanické energie na energii elektrickou, čistotu krystalu atd.

Piezoelektrické zapalování se nedočkalo velkého rozvoje především kvůli své nespolehlivosti a velkým rozměrům.

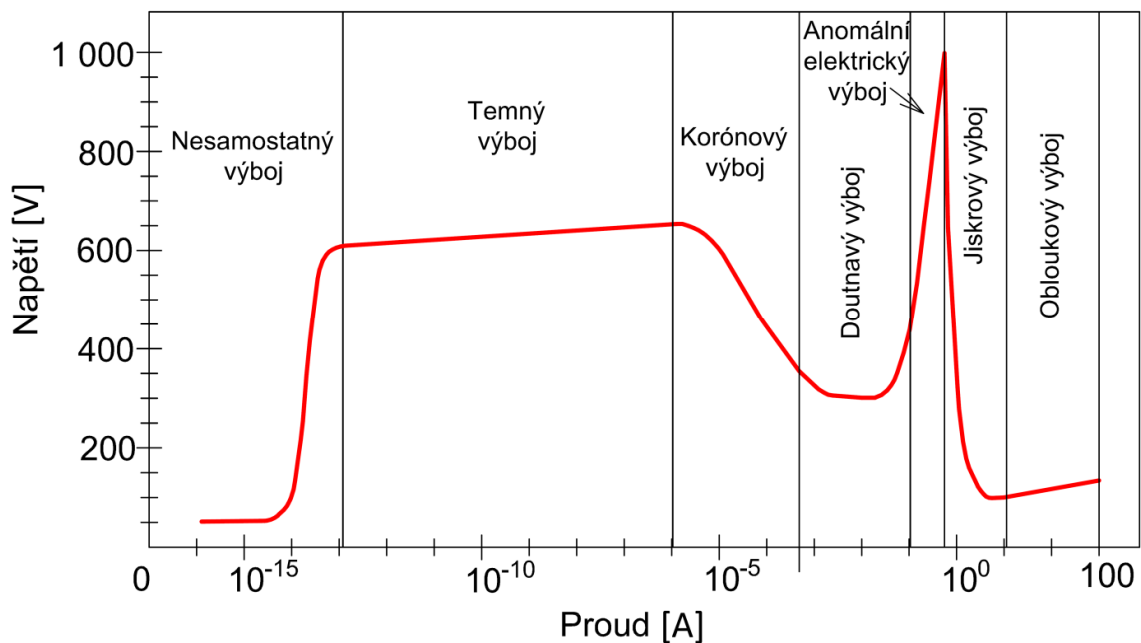


Obr.22: Schéma piezoelektrického zapalování

7. Vysokofrekvenční zapalování

Někdy označováno zkratkou ACIS (zkratka z *Advanced Corona Ignition System* tj. „systém pokročilého korónového zapalování“). Od výše zmíněných zapalovacích systémů, u kterých je spalování iniciováno jiskrou zapalovací svíčky, dochází zde k zapálení směsi paliva vysokoenergetickým elektrostatickým polem uvnitř spalovacího prostoru. Jedná se tedy o trsovitý výboj, který vzniká v nehomogenním elektrickém poli okolo drátů, hrotů a hran s vysokým potenciálem, kterému se říká koróna. Koróna je jev běžně se vyskytující např. na drátech vysokého napětí, v silných atmosférických polích před bouřkou, na skalních útesech nebo na lodích, kde je tento jev znám pod názvem Eliášův oheň. Jedná se o jeden z mnoha druhů výbojů, jak ukazuje obr. 23.

Vysokofrekvenční zapalování využívá 12 V z elektrické sítě automobilu, které následně zvýší na méně než 150 V. Toto napětí putuje do vysokofrekvenčního zesilovače.



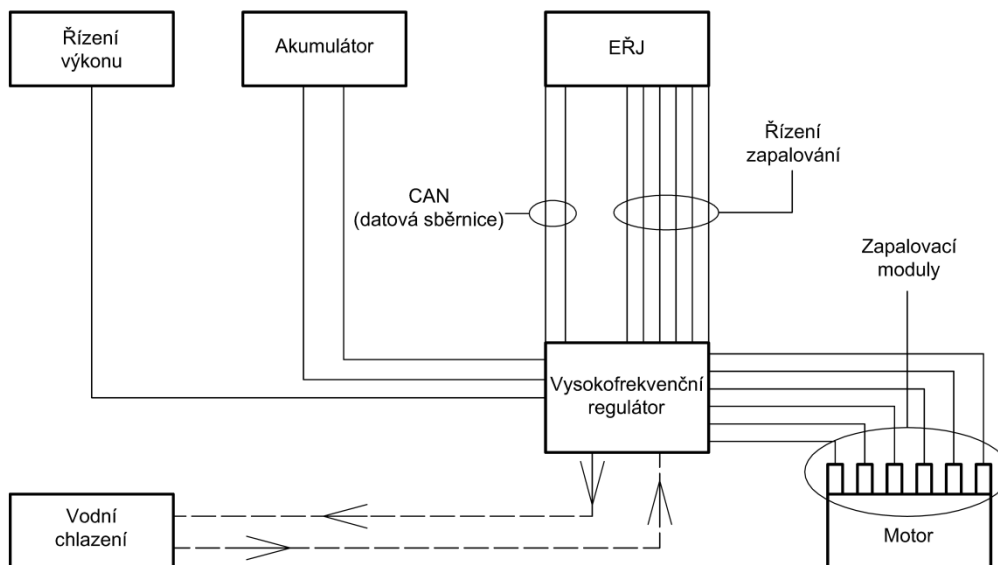
Obr.23: Voltampérová charakteristika elektrického výboje

7.1. Vysokofrekvenční zapalování EcoFlash

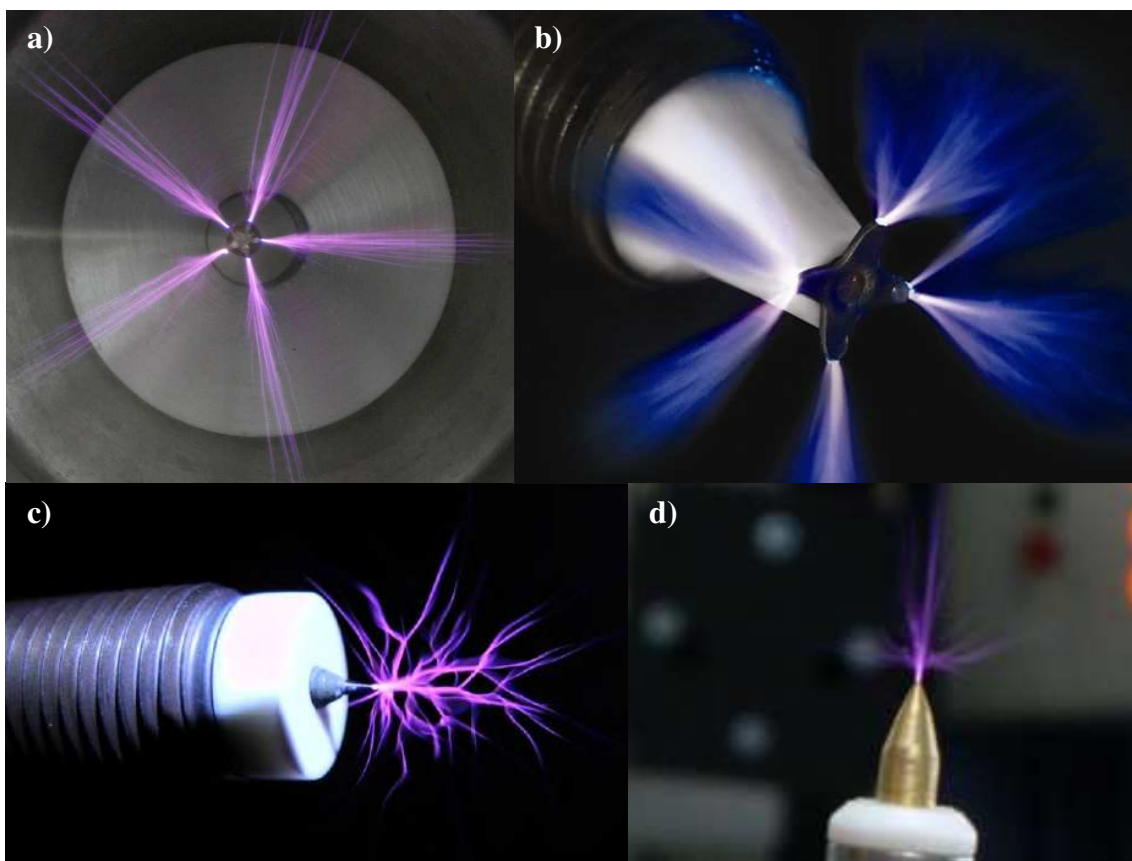
Firma BorgWarner pracuje na svém zařízení vysokofrekvenčního zapalování s názvem EcoFlash. Jedná se o systém navržený pro osobní automobily skládající se z vysokofrekvenčního regulátoru, tří až šesti zapalovacích modulů v závislosti na počtu válců a dalších součástí, které se používají u konvenčních zapalovacích systémů (viz obr. 24). Kably vedoucí od vysokofrekvenčního regulátoru k zapalovacím modulům jsou koaxiálního typu. V zapalovacích modulech se napětí naposledy transformuje pomocí rezonančního obvodu integrovanému přímo do zapalovačů. Napětí, které je zde transformováno, je menší než 1 kV. Maximální efektivní příkon EcoFlash systému je 350 W u verze s šesti válci. Systém označovaný jako prototyp A (viz obr. 24) se testoval na přeplňovaném čtyřválcí o zdvihovém objemu 2,0 l a s vícebodovým vstřikováním paliva (MPI). Zapalovací energie byla 50 mJ, což je v souladu s $COV_{IMEP} < 2,6\%$ (směrodatná odchylka středního indikovaného tlaku). energii zapalování menší než 25 mJ byla testována na malém dvoutaktním benzínovém motoru o zdvihovém objemu 92 cm³. Prototypové systémy A jsou stále z velké části testovány na zkušebních stolicích, ale postupně jsou nahrazovány typem B. Ty jsou v současné době ověřovány a měly by přibližně zdvojnásobit elektrickou účinnost nově vyvinutého komunikačního rozhraní.



Obr.24: Dva prototypy HF regulátoru vysokofrekvenčního zapalování, typu A a B [5]



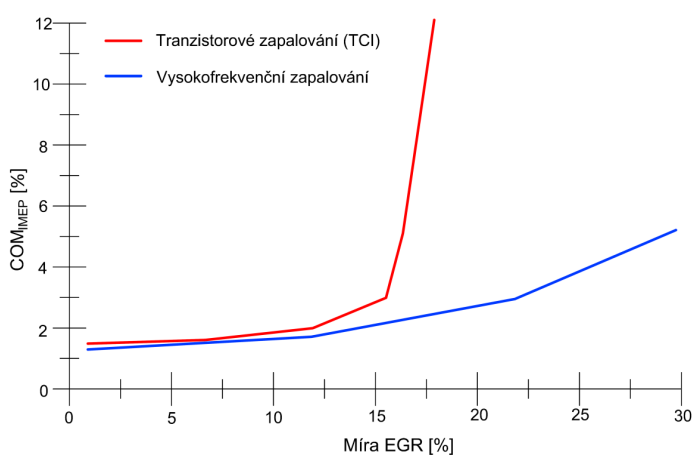
Obr.25: Schéma vysokofrekvenčního zapalování pro šestiválcový motor



Obr.26: Různé vysokofrekvenční zapalovací moduly s korónovým výbojem
a) - BorgWarner a systém ECCOS [23], b) - Federal-Mogul [14], c) - BorgWarner a systém EcoFlash [5], d) - BERU [1]

7.1.1. Zvýšení tolerance EGR při částečném zatížení

Aktuální přeplňovaný čtyřválcový motor s přímým vstřikováním paliva a zdvihovým objemem 1,4 l byl dodatečně vybaven nízkotlakým systémem recirkulace výfukových spalin (EGR). Provádělo se zde detailní srovnání prototypového systému zapalování EcoFlash A a konvenčního tranzistorového zapalování se zapalovací energií 90 mJ. Zapalovací svíčka byla umístěna v ose válce a vstříkovač byl umístěn z boku válce. Použitý píst s plochým dnem určený pro kombinované proudění směsi nemusel být upraven pro vysokofrekvenční zapalování. Nicméně je třeba dodat, že případná modifikace geometrie pístu a spalovací komory by přispěla k lepším výsledkům, než je popsáno zde. Zkouška zahrnovala postupné zvyšování míry EGR při částečném zatížení pro různá zatížení v rozmezí 2 000 až 4000 min⁻¹ a při průměrném tlaku 2 až 14 bar. Pro příklad zatížení při 2 000 min⁻¹ a 6 bar vykazuje systém EcoFlash významný nárůst míry EGR u vysokofrekvenčního zapalování oproti tranzistorovému zapalování (viz. obr. 27). Vezme-li se v úvahu systémové kritérium plynulosti $COV_{IMEP} \leq 5\%$, dosáhla míra EGR 29,7%, což je o 13% více než u konvenčního zapalování. Zlepšení tolerance EGR v ostatních pracovních bodech mělo podobný pozitivní nárůst. Kromě toho je obecně mnohem kratší zpoždění zážehu a doba hoření je též kratší v případě vysokofrekvenčního zapalování. Zpoždění zapalování je obvykle o 5 až 20 °KH kratší s rostoucí mírou EGR. Z hlediska doby hoření (5 až 90% shořelé složky ve válci) se ve srovnání s konvenčním zapalováním zlepšila doba hoření o 5 až 10 % (2 až 3,5 °KH) a to i v případě vysoké míry EGR. To následně vede ke zlepšení účinnosti.



Obr.27: Srovnání hodnoty COV_{IMEP} v závislosti na míře EGR v případě řízeného postupného ředění výfukovými plyny (pracovní otáčky 2 000 min⁻¹ a středním indikovaným tlakem 6 bar), mezi 90 mJ tranzistorovým zapalováním (TCI) a vysokofrekvenčního systému EcoFlash. [5]

V textu výše je uváděna zkratka COV_{IMEP} , což se jedná o parametr směrodatné odchylky středního indikovaného tlaku, který představuje cyklické změny tlaku naměřené během x cyklů experimentu. Je tedy definována jako poměr mezi směrodatnou odchylkou σ_{IMEP} a průměrnou odchylkou středního indikovaného tlaku IMEP.

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{IMEP} \cdot 100\%$$

COV_{IMEP} je přímo úměrný ke stabilitě spalování. Jeho velikost se zvyšuje při nízkých otáčkách a zatížení motoru, a to hlavně při volnoběžných otáčkách motoru, při relativně pomalém pohybu směsi, vyšším podílu zbytkových spalin ve válci a malou intenzitou turbulencí.

7.1.2. Dlouhodobé zkoušky motoru

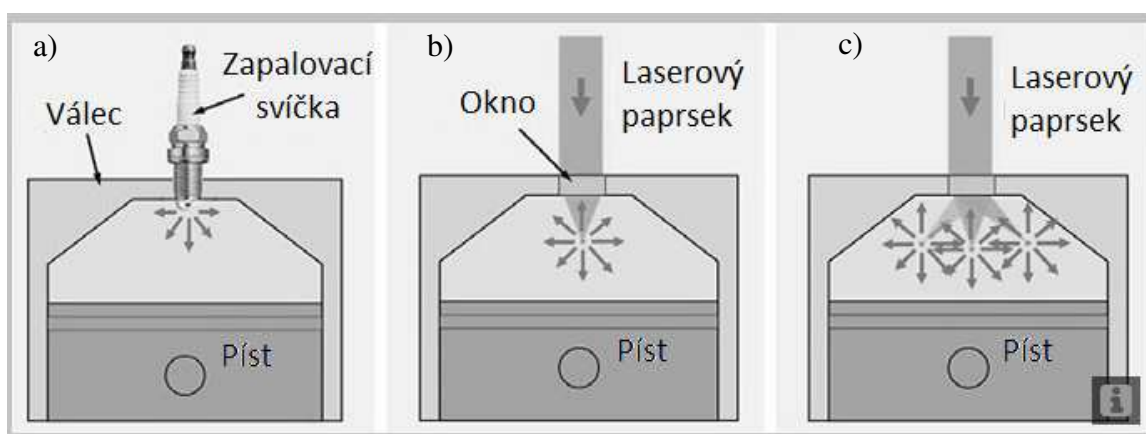
Z odborné literatury je známo, že prostorový rozsah šíření korónového výboje je nepřímo úměrný velikosti tlaku plynu. Z tohoto důvodu je velice důležitá velikost korónového výboje při vysokých tlacích, které jsou u moderních motorů. Tento požadavek lze snadno v současném stavu vývoje splnit systémem EcoFlash.

Dlouhodobé zkoušky se prováděly na přeplňovaném motoru o zdvihovém objemu 1,4 l s vysokým zatížením o délce trvání 500 hodin. Sledovala se zde v závislosti na čase stálost provozních parametrů vysokofrekvenčního zapalování jako je příkon a střední frekvence zapalování. Samotná zkouška se vždy přerušovala v pravidelných intervalech, kdy se sledovalo opotřebení. Systémové parametry zapalování nevykazovaly žádné významné systematické změny během provozu. Nízké opotřebení hrotů elektrod korónových zapalovacích modulů umožňuje očekávat jejich životnost ve vozidle mnohem déle než 100 000 km. Byla zjištěna i lepší odolnost vůči klepání motoru a tím snížení specifické spotřeby paliva bez speciální úpravy geometrie spalovací komory. Je taky možné v plném zatížení posunout bod 50-ti procentního shoření směsi až o 4 °KH dříve ve srovnání s tranzistorovým zapalováním.

8. Laserové zapalování

Předchozí druhy zapalování se od sebe lišily různými konstrukčními prvky. Jediné, co bylo vždy stejné (kromě vysokofrekvenčního zapalování), byla zapalovací svíčka. Ta se od roku 1902, kdy ji uvedla na trh firma Bosch, prakticky nezměnila. Ovšem v roce 1978 přišla na přednes myšlenka nahradit klasickou zapalovací svíčku laserem. Jistou nevýhodou v té době byl fakt, že lasery nedisponovaly dostatečným výkonem, byly příliš rozměrné a drahé a tím pádem nemohly být vhodnou alternativou pro konvenční zapalovací systémy. Proto se po přibližně následujících dvacet let laserové zapalování omezovalo pouze na výzkumné laboratoře. Obrat nastal na počátku 21. století, kdy laserová technika pokročila natolik, že ji bylo možné instalovat do velkých stacionárních motorů.

Důležité je uvést, proč vlastně nahrazovat zapalovací svíčku laserem. Zapálení směsi paliva se vzduchem za pomoci laseru lze docílit nezanedbatelných výhod. Zapalovací svíčka je omezoována délkou elektrody, kde vzniká elektrický výboj. Tím se může hořící směs ochlazovat o stěny spalovacího prostoru. Oproti tomu laser je schopný zapálit směs kdekoliv v pracovním prostoru a dokonce lze docílit násobného bodu zapálení. Toho se docílí použitím separátních laserových paprsků zaměřených do vhodně vybraných bodů ve spalovacím prostoru (obr. 28).



Obr.28: Možnosti zapálení směsi ve spalovacím prostoru [6]

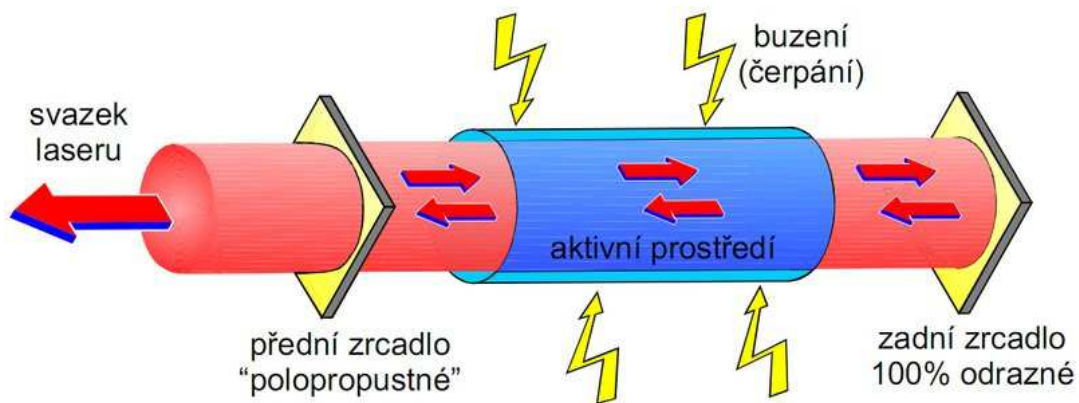
a) pomocí zapalovací svíčky, b) pomocí laserového paprsku, c) vícenásobné zapálení pomocí laseru

Laser je také schopen směs zapálit v kratší době, a to v řádech nanosekund než zapalovací svíčka, kde se časy zapálení pohybují v řádech milisekund. Dalšími výhodami je schopnost zapálit chudší směs, schopnost pracovat při vysokých kompresních poměrech, zlepšení účinnosti zapalování, snížení otáček na prázdno a regulace energie zapalování. Tyto výše zmíněné výhody zapříčiňují především snížení emisí NO_x , spotřeby paliva a následné snížení emisí CO_2 .

8.1. Princip laseru

Laser je zkratka z anglického *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, tj. „zesilování světla stimulovanou emisí záření“. Jedná se o optický zdroj vysoce koherentního elektromagnetického záření nejčastěji ve viditelné, ultrafialové nebo infračervené oblasti spektra, který vzniká díky stimulované emisi záření aktivních částic (atomů, molekul, iontů, elektronů) buzených vnějším zdrojem energie (viz obr. 29). Tato energie může být soustředěna ve velice krátkém čase na určité místo. Vyzařované světlo je monochromatické (kmitá na jediné frekvenci). Princip laseru využívá zákonů kvantové mechaniky a termodynamiky.

Laser je založen na principu vynucené (stimulované) emise záření. Elektrony v atomech látky aktivního prostředí jsou nejprve excitovány na horní energetickou hladinu, kde se však neudrží a v miliontině sekundy přeskóčí na hladinu pracovní (metastabilní dráha) [7]. Díky slabému impulzu ve formě stimulujícího fotonu dochází k deexcitaci (přechod atomu z vyššího kvantového stavu do nižšího) spojené s emisí stejného fotonu, jakým byl stimulující. V důsledku toho lavinovitě vznikají stejné fotony, které jsou vyzařovány stejným směrem. K zesilování světla v aktivní části laseru slouží rezonátory, které jsou tvořeny zrcadly (nepropustnými a polopropustnými). Díky rezonátorům dochází k opětovnému odrazu fotonů a jejich opětovným průchodem aktivním prostředím. Výsledný světelný svazek pak opouští rezonátor průchodem skrze výstupní zrcadlo, které je polopropustné. Laser se tedy skládá s aktivního prostředí, které je tvořeno látkou obsahující oddělené kvantové energetické hladiny elektronů, rezonátor, zdroje záření, který dodává energii elektronům v aktivním prostředí tak, aby se mohly přesouvat z nižší energetické hladiny na vyšší energetickou hladinu. Zdrojem záření může být např. elektrický proud, výbojka, chemická reakce a jiné lasery.



Obr.29: Schéma principu laseru [8]

Lasery lze rozdělit do různých kategorií. Základní rozdělení je podle aktivního prostředí, časového průběhu a výkonu.

Podle aktivního prostředí:

- **Pevnolátkové** – nejznámějším typem je laser rubínový (vyzařuje červený laser), dále laser s neodymovým sklem, který je schopen produkovat silné záření. V pulzním režimu je schopen během 10–12 s dosáhnout výkonu až 106 MW, proto se s ním počítá jako se zdrojem laserového vybuzení u termojaderné reakce.
- **Polovodičové** - dosahují výstupního výkonu až 2 W. Všeobecně patří mezi nejpoužívanější lasery, uplatnění mají zejména v telekomunikacích, ve výpočetní technice a medicíně.
- **Plynové** - aktivní plynné prostředí je tvořeno atomy, ionty nebo molekulami. Pracují ve velmi širokém rozsahu vlnových délek v kontinuálním nebo pulzním režimu. K nejrozšířenějším typům patří helium-neonový laser (červeně zářící), argonový nebo helium-kadmiový (červenooranžové, zelené a modré záření). V průmyslu a medicíně se nejvíce rozšířený infračervený laser CO₂.
- **Molekulární plynové lasery** - sem patří například infračervený laser CO₂. Vynikají vysokou účinností a mohou vyzařovat velkou energii. Používají se například jako „laserový skalpel“ pro bezdotykové řezání tkání.
- **Excimerové lasery** - mohou pouze existovat v excitovaných elektronových stavech (v základním stavu se jejich složky vzájemně odpuzují). Jsou to jedny z nejdůležitějších plynových laserů, které pracují v ultrafialové oblasti. Používají se zejména v medicíně.
- **Kapalinové** - aktivním prostředím je nejčastěji vodný či alkoholový roztok organického barviva. Tyto lasery se nazývají barvivové lasery a využívají se v

spektroskopii a informační technice. Jejich výhodou je plynulá možnost změny vlnové délky.

- **Plazmové rentgenové** – jako aktivní prostředí může být použit například uhlíkový terč ozařován CO₂ laserem v pulzním režimu. Disponující vysokou energií, která se může využít ke vzniku plazmy či k odpařování těžko tavitelných kovů (wolfram, tantal).
 - **Lasery s volnými elektrony** – označovány též jako FEL (zkratka z „Free Electron Laser“). Využívají magnetického pole, které je tvořeno periodickou soustavou magnetů střídavé polarity. Aktivním prostředím je svazek relativistických elektronů, které se pohybují v magnetickém poli. Elektrony nejsou vázané na atomy, ale nejsou ani úplně volné, protože jejich pohyb je ovlivňovaný magnetickým polem. Vlnovou délku emise lze v širokém oboru ladit změnou energie elektronů ve svazku a změnou periody magnetického pole.
- [7]

Podle časového režimu:

- Kontinuální
- Impulzní
- Kvazikontinuální – jedná se o jistý přechod mezi kontinuálními a impulsními lasery, kdy jejich pulsy jsou delší než 200 ns.

Podle výkonu:

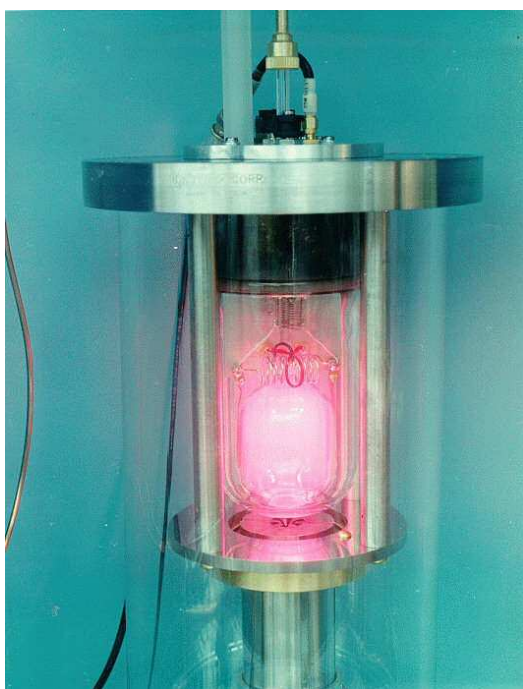
- nízkovýkonné (neinvazivní) s výkonem od 10⁻³ do 1 W
- vysokovýkonné (invazivní) s výkonem nad 1 W

S výkonem laseru souvisí parametr nazývaný hustota výkonu. Ta určuje poměr výkonu laseru k ozařované ploše, jednotkou je W·cm⁻². Další parametrem je hustota energie, která je poměrem násobku výkonu laseru a doby ozařování k ozařované ploše, jednotkou je J·cm⁻². Jinými slovy to znamená, že čím méně výkonný laser se použije, tím delší dobu se musí dané místo ozařovat, aby bylo dosaženo stejné hustoty energie jako při použití výkonnějšího laseru. Dále by se daly lasery dělit například podle počtu energetických hladin (2, 3 a více hladinové), vlnové délky vydávaného záření (infračervené, lasery v oblasti viditelného světla, ultrafialové a rentgenové lasery) nebo podle způsobu čerpání energie (opticky, elektricky, chemicky, termodynamicky, jadernou energií).

8.2. Historie laseru

Laser byl fyzikálně popsán už v roce 1917 Albertem Einsteinem (1879 – 1955), ovšem funkční laser předvedl až v roce 1960 Theodore Harold Maiman (1927 – 2007). Jako aktivní prostředí použil krystal rubínu s využitím tří energetických hladin. Laser proto mohl pracovat pouze v pulzním režimu. V roce 1963 vynalezl Ind Čandra Kumar Naranbhai Pate (nar. 1938) první plynový laser, který používal aktivní prostředí CO_2 .

Předchůdcem laseru byl maser (zkratka z "Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation", tj. zesilování mikrovln pomocí stimulované emise záření), který pracuje na stejném principu (stimulovaná emise) jako laser, avšak generuje mikrovlnné záření. První maser sestavili Charles Hard Townes (1915 – 2015), James Power Gordon (1928 – 2013) a Herbert Zeiger (1925 - 2011) v roce 1953. Tento prototyp však nebyl schopný fungovat nepřetržitě. Nikolaj Gennadijevič Basov (1922 – 2001) s Alexandrem Michajlovičem Prochorovem (1916 – 2002) následně vyřešili problém kontinuálního režimu maseru (předtím bylo možné používat maser pouze v pulzním režimu) použitím více než dvou energetických hladin, čímž dosáhli udržení inverzní populace po celou dobu chodu maseru. Oba dva popsali princip maseru už v roce 1952. První maser (vysoce účinný třístupňový krystalový maser) schopný pracovat v kontinuálním režimu byl vytvořen roku 1956 Nicolaasem Bloembergenem (nar. 1920). V roce 1964 získali Charles Hard Townes, Nikolaj Gennadijevič Basov a Alexandr Michajlovič Prochorov Nobelovu cenu za výzkum v oblasti kvantové elektroniky.



Obr.30: Část vodíkového maseru [9]

8.3. Laserové zapalovací systémy

Laserové zapalování představuje lákavý alternativní způsob, jak zapalovat směs paliva ve spalovacím motoru. Výhodou je možnost přesného zacílení paprsku laseru ve spalovací komoře díky zaostření čočky tak, aby výsledná plazma zapálila směs paliva. Dále absence zhášejícího účinku elektrod vede k nižší energii zapalování a možnosti ještě přesnějšího časování zapalování, v neposlední řadě ke schopnosti zapálit velmi chudou směs. Zapálení chudé směsi je důležité zejména pro snížení produkce NO_x ve výfukových plynech a možnosti se tím vyhnout nákladných systémů k jeho odstraňování. U plynových motorů to znamená alternativu k velmi vysokým napětím u zapalovacích svíček, které jsou spojeny s vyšší náročností elektroinstalace. Minimální energie potřebná pro zažehnutí směsi paliva se snižuje se zvyšujícím tlakem ve válci, což je přesný opak u klasických zapalovacích systémů.

Pro zážehové motory na benzín s přímým vstřikem paliva je laserové zapalování ideální z důvodů absence jiskry, která může zaniknout v kapičkách špatně rozprášeného paliva. Pomocí laseru lze zapálit směs kdekoliv uvnitř spalovacího prostoru, protože na rozdíl od zapalovací svíčky neobsahuje elektrody. Optimálně lze směs paliva zapálit dále od studených stěn válce, čímž se následný plamen od počátku neochlazuje a může se šířit rovnoměrněji, což vede ke zvyšování účinnosti. Kromě toho lze jedním zapalovacím laserem zapálit směs paliva na několika místech ve spalovacím prostoru najednou. Jedná se tedy o vícebodové zapalování.

Co se týče samotného mechanismu laserového zapalování, byly zjištěny čtyři typy: nerezonanční zapalování průrazem, rezonanční zapalování průrazem, tepelné zapalování a fotochemické zapalování. Nejvíce studován a používán je typ nerezonančního zapalování průrazem, který je podobný konvenčnímu zapalování zapalovací svíčkou.

Jedním z hlavních problémů laserového zapalování je jeho velikost, což brání aplikacím u osobních automobilů. Pokud jde o rozložení energie laseru v palivu, hovoříme o hustotě energie kolem $100 \text{ GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ v ohnisku zážehu. Energie pulzu se pohybuje okolo 10 až 100 mJ, která je vyzářena během 10 ns. Ale běžně dostupné laserové systémy mají velikost stolní desky kvůli složitosti a hlavně pak kvůli chladičímu systému laseru. Aby byly sníženy náklady a mohl se použít relativně velký laser, bylo by výhodné použít u víceválcových motorů multiplexní systém (vícebodové zapalování), který z jediného laseru vysílá pulzy každému válci prostřednictvím

optických vláken. Jenže při výše zmíněných výkonech laseru jsou optická vlákna rychleji poškozována. Jistou možností, jak zabránit poškození optických vláken, je instalace mikrolaserových modulů na každý válec zvlášť o velikosti porovnatelné s běžnou zapalovací svíčkou. Laserové moduly by byly taktéž napájeny přes optická vlákna, ovšem nižší intenzitou světla a jednoho zdroje čerpací diody.

8.4. Druh použitého laseru

Pro laserové zapalování se používá zatím jediný druh laseru a tím je Nd:YAG/Cr⁴⁺. Zkratka YAG pochází z anglických slov Yttrium aluminium garnet, což znamená yttrito hlinitý granát (Y₃Al₅O₁₂). Hovoříme o opticky izotropním krystalu kubické struktury. V současné době se jedná o nejdůležitější krystal pro granátové lasery, neboť je zvládnuta jeho technologie výroby a opracování do tvarů tyčí při zachování nejvyšší optické kvality. Jde o nejrozšířenější pevnolátkový druh laseru, který má využití od medicíny až po průmysl. Laser je dopován ionty neodymu (Nd³⁺) a chromu (Cr⁴⁺). Samotný laser Nd:YAG má typickou vlnovou délku emitovaného záření 1 064 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). Může 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.

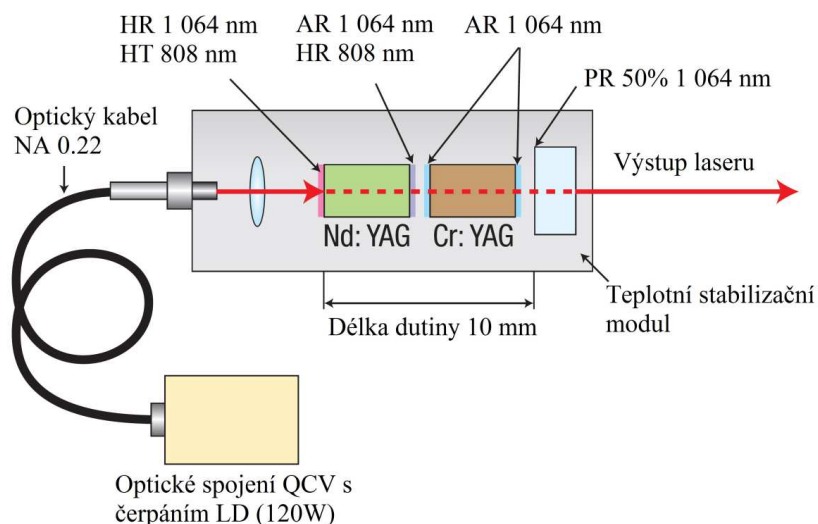
Jedná se o metodu spínání, kdy laser dosahuje krátkých impulsů o špičkovém výkonu. Podstatnou roli zde hraje tzv. Q-faktor - činitel jakosti optického rezonátoru. Jedná se o skokovou změnu kvality rezonátoru atenuátorem (neboli zeslabovačem), u laseru tedy o prvek, který záměrně zvyšuje ztráty v rezonátoru a zabraňuje tak brzkému nasazení oscilací nebo stimulované emise. Q-spínání lze rozdělit na aktivní a pasivní.

U aktivního Q-spínání je možno aktivně zasahovat do procesu ztrát v rezonátoru, a to několika způsoby. Akusticky, mechanicky (rotujícím zrcadlem či závěrkou) nebo elektricky využívajících materiálů, které v elektrickém poli mění polarizaci procházejícího světla (Kerrova cela) nebo index lomu (Pockelsova cela). Pasivní Q-spínání používá saturovatelné absorbéry, tj. látky vyznačující se tzv. nelineární absorpcí (se zvyšující hustotou záření se zvyšuje transmise daného materiálu). Jde o látky absorbující záření s vlnovou délkou stejnou jako je generované záření. Na začátku

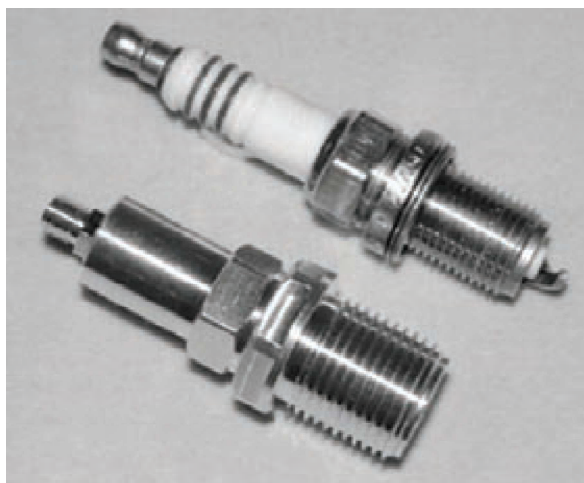
procesu je barvivo pro laserové světlo prakticky nepropustné, protože neexcitovaných absorpčních center je mnoho a fotony je excitují. S pokračujícím průchodem záření je stále více absorpčních center excitováno, až se všechna nasatí a látka je pro laserové záření transparentní – jakost rezonátoru se skokově zvětšuje. Během tohoto procesu ovšem buzení metastabilních hladin pokračovalo, inverzní populace stavů se zvětšovala a tak zprůhlednění absorbátoru způsobí rychlé uvolnění akumulované energie v obřím pulzu laserového záření. V současné době se dosahuje trvání pulzu až po dobu řádově 10^{-15} s (tzv. femtosekundový laser) při opakovací frekvenci v řádu kHz. [10] U laserového zapalování se používá pouze pasivní Q-spínání.

8.5. Mikrolaserový laser s pasivním Q-spínáním pro zapalování

Na obr. 31 je ukázáno schéma mikrolaseru s pasivním Q-spínáním a na obr. 32 je fotografie mikrolaserového zapalovacího modulu v porovnání s klasickou zapalovací svíčkou. Tzv. čerpání laseru je zajišťováno laserovou diodou s konstantním výkonem 120 W a dopravováno k laserovému modulu přes optické vlákno (kabel) o průměru 0,6 mm. Čerpané světlo je z optického vlákna za pomoci čočky v modulu zostřeno na průměr 1,1 mm do aktivního média. To je tvořeno antireflexním povlakem s odrazivostí menší než 0,2 %, s vlnovou délkou 808 nm a vysokoodrazivým povlakem s odrazivostí větší než 99,8 % a s vlnovou délkou 1 064 nm. Oba povlaky jsou na krystalu Nd:YAG. Antireflexní povlaky s odrazivostí menší než 0,2 % a s vlnovou délkou 1 064 nm jsou uloženy z obou stran saturevaného absorbéru krystalu Cr^{4+}YAG o délce 4 mm. Výstupní spojení je ploché s odrazivostí 50 % a vlnovou délkou 1 064 nm. Délka samotné dutiny s oběma krystaly je dlouhá 10 mm. Modul neobsahuje zaměřovací optiku výstupního paprsku pro zaměření.



Obr.31: Schéma Nd:YAG/Cr laseru s Q-spínáním, QCW – kvazikontinuální vlnění, NA – numerická aparatura, HR – vysoko odrazová vrstva, HT – vysoko propustná povlak, AR – antireflexní povlak, PR povlak s částečnou odrazivostí [11]



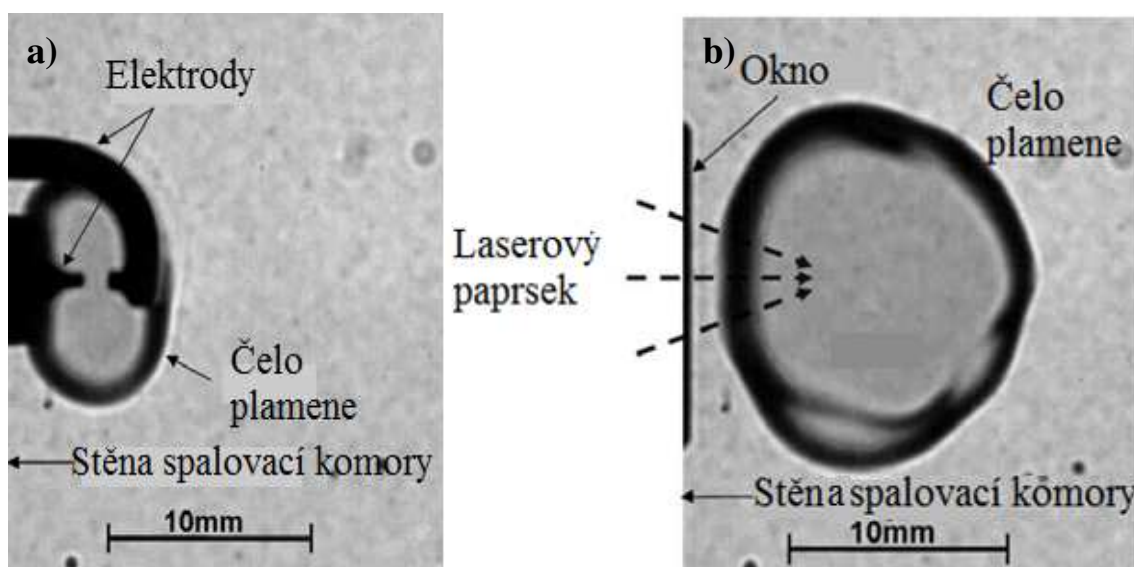
Obr.32: Porovnání mikrolaserového modulu (dole) s klasickou zapalovací svíčkou (nahore) [13]

8.6. Laserové zapalování u motoru na propan

Laserové zapalování bylo testováno pro stechiometrickou směs propanu (C_3H_8) a vzduchu v konstantním objemu motoru $\sim 200\text{ cm}^3$ při pokojové teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$ a atmosférickém tlaku 100 kPa. Srovnával se mikrolaser, který používal pasivní Q-spínání s klasickou zapalovací svíčkou. Propan se vzduchem byly důkladně smíseny ve stanoveném poměru a přivedeny do spalovací komory. Experiment byl proveden pro zapalování s konstantním průtokem palivové směsi v komoře. Komora je vybavena třemi pozorovacími okny. Dvě okna jsou umístěna z boku proti sobě pro vizualizaci proudění a jedno okno pro pozorování laseru nebo zapalovací svíčky.

Spalovací procesy byly pozorovány pomocí Schlierenovy optiky (tzv. šlírování), která je schopna zobrazit malou změnu indexu lomu v proudění v plynech a kapalinách. Do spalovací komory přes okna bylo přivedeno světlo produkované xenonovou výbojkou a obraz byl zaznamenáván vysokorychlostní kamerou (25 000 snímků za sekundu) synchronně s laserovými pulzy nebo elektrickou spouští. Na obr. 33 jsou ukázány dvě Schlierenovy fotografie zachycující počáteční fázi zapálení stechiometrické směsi zapalovací svíčkou a mikrolaserem.

Směšovací poměr paliva ke vzduchu je 15,2. Celková energie vycházející z laseru je ~ 9 mJ (3 pulsy) a vstupní energie přicházející do laseru byla 35 mJ. Laserový paprsek je uvnitř komory zaostřen oknem tvořeným asférickou čočkou s ohniskovou vzdáleností 10 mm, což odpovídá postavení zapalovací svíčky tak, aby bylo možno obě varianty porovnat. Zobrazování laseru a zapalovací svíčky v komoře má na snímcích stejnou pozici i měřítko.



Obr.33: Schlierenovy fotografie zachycující počáteční fázi iniciaci zapálení stechiometrické směsi paliva, a) - zapalovací svíčka, b) – mikrolaser [12]

Jak je patrné na obr. 33 a) i b), je průřez jádra plamene po 6 ms generovaný laserem 3× větší, než je tomu u zapalovací svíčky, a to i přesto, že laser má o 1/3 menší energii než zapalovací svíčka. To potvrzuje, že laserové zapalování účinně urychluje růst jádra plamene vzhledem k absenci zhášejícího účinku elektrod. Směs propanu a vzduchu byla postupně měněna od poměru 15,2 (stechiometrická směs) až na poměr 18,1. Dále se měnil počet laserových pulsů od 1 až po 5 změnou doby čerpaní LD.

V tabulce 1 je ukázána pravděpodobnost zapálení směsi paliva (propan se vzduchem) za pomoci laseru a zapalovací svíčky zjištěné z dlouhodobých testů zapalování v každém jednotlivém stavu. První dva sloupce ukazují součinitel přebytku vzduchu a směšovací poměr. U laseru je vždy údaj o počtu pulzů a jejich celková optická energie. Z tabulky je patrné, že pravděpodobnost zapálení chudší směsi se zvyšuje z počtu laserových pulzů. Pak je zřejmé, že u chudší směsi je zapotřebí vyšší celková energie pro zážeh. Nejbohatší směs, kterou se za pomoci laseru dalo zapálit, byla směs se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda = 0,88$ s pěti laserovými pulzy a s optickou energií 13 mJ. Proto je vícenásobný pulz při zapalování vhodnější při skutečných aplikacích, než ve srovnání s jedním velkým pulzem s optickou energií větší než 10 mJ. S vysokou celkovou energií ovšem roste poškození optických vrstev na optice. Z výsledků měření pomocí Schlierenova fotografování bylo pozorováno, že u chudých směsí (jeden pulz s energií 3 mJ) dochází ke vzniku poruch jádra plamene, což vedlo k snížení rychlosti plamene ve srovnání se stechiometrickou směsí. Řešením tedy bylo zvýšení laserových pulzů. Zapalovací svíčka měla problém zapálit směs už při $\lambda 0,97$, kde pravděpodobnost zážehu činila 33 %. Z fotografií bylo prokázáno, že růst jádra plamene byl pomalý a doba kontaktu jádra plamene s elektrodami zapalovací svíčky dlouhá. Z toho plyne, že čím byla směs chudší, tím byl vyšší zhášecí faktor elektrod.

Propan + vzduch		Laser [%]					Zapalovací svíčka [%]
Lambda směsi	Směšovací poměr	1 pulz (3 mJ)	2 pulzy (5,6 mJ)	3 pulzy (8,1 mJ)	4 pulzy (10,6 mJ)	5 pulzů (13 mJ)	
1	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	-

Tab.1: Srovnání zapalovací schopnosti laseru a zapalovací svíčky s různými směšovacími poměry a s různým počtem pulzů laseru. [14]

8.7. Laserové zapalování u motoru na CNG

Přísné emisní normy pro výfukové plyny a požadavek po vyšší tepelnou účinnost motorů si vynutily vývoj nových technologií a využití alternativních zdrojů paliv. Stlačený zemní plyn CNG (zkratka z „Compressed Natural Gas“ tj. „stlačený zemní plyn“) je jedno z nejlepších alternativních paliv. Jeho výhodou jsou zejména vysoké zásoby, nízké emise při jeho spalování a tím velký přínos pro životní prostředí a také nízká pořizovací cena. Palivo CNG může být provozováno s vyšším kompresním poměrem díky vysokému oktánovému číslu oproti benzínu, což má za následek zvýšení tepelné účinnosti a snížení spotřeby paliva. Emise výfukových plynů jsou nižší ve srovnání s jinými uhlovodíkovými palivy vzhledem k obsahu metanu (cca 98 %), který obsahuje nejméně uhlíku (CH_4). Emise vypouštěné z výfuků spalovacích motorů mohou být sníženy optimalizací spalování ve válci nebo pomocí katalyzátoru.

Proto je velký zájem o technologii, která by u spalovacích motorů zlepšila tepelnou účinnost a snížila výfukové emise. Slibným prostředkem k dosažení výše zmíněných cílů je spalování chudé směsi. Nicméně spalování chudé směsi je spojeno se dvěma hlavními problémy - ztráta výkonu a pomalejší hoření ve válci. Ztrátu výkonu motoru lze kompenzovat zvýšením hustoty náboje od zapalovací svíčky. Zvýšená hustota náboje však vyžaduje vyšší sekundární napětí na cívce pro zapalování za použití konvenčních zapalovacích systémů. Napětí potřebné pro vytvoření jiskry závisí na několika faktorech – tlaku ve spalovacím prostoru v okamžiku zapálení, vzdálenosti mezi elektrodami zapalovací svíčky a teplotě nasávané směsi. Zajištění požadovaného napětí pro tyto podmínky by vedlo k erozi elektrod zapalovací svíčky. Vzhledem k tomu, že chudé směsi mají relativně nižší rychlost hoření, než je tomu u stechiometrických směsí, bylo by vhodné využít metodu, která poskytne intenzivnější a spolehlivější vzplanutí počátečního jádra plamene, nebo zvýšit rychlost hoření ve směsi.

Rychlost šíření plamene v chudé směsi u zážehového motoru může být zvýšena vytvořením víření ve válci nebo zkrácením doby vzplanutí pro stejný směšovací poměr. Zkrácení doby vzplanutí lze realizovat použitím více zapalovacích svíček ve válci nebo umístěním zapalovací svíčky do vhodného místa. Vložení několika zapalovacích svíček do válce je v dnešní době velice problematické z důvodů nedostatku místa. Laserové zapalování splňuje většinu těchto požadavků a nabízí řadu výhod pro zapálení chudé směsi.

8.7.1. Uspořádání systému pro laserové zapalování

Laserové zapalování se zkoušelo na upraveném čtyřtaktním nepřepřlňovaném jednoválci chlazeném vodou. Vrtání se zdvihem motoru bylo 102 mm a 116 mm, kompresní poměr činil 9,8:1. Motor byl brzděn za pomoci dynamometru využívající vířivé proudy. K samotnému spuštění motoru sloužil asynchronní motor spojený přes převodovku k dynamometru, který se automaticky odpojil po úspěšném nastartování spalovacího motoru.

Směšovací poměr paliva a vzduchu byl měřen samostatně průtokem vzduchu a paliva. Pro měření průtoku nasávaného vzduchu sloužil laminární prvek (LIFE) (Meriam, 50MC2-2F). Palivo CNG bylo uloženo v tlakové nádrži o vysokém tlaku s redukčním ventilem pro provozní tlak 1 bar. To bylo přiváděno přímo před škrtkící klapku do sání vzduchu. Pro měření hmotnostního průtoku CNG se používal průtokoměr měřící na základě Coriolisovy síly (Emerson, CMF010M). Pro experiment se použily dva typy zapalovacích systémů: zapalování za pomoci jiskry (zapalovací svíčky) a laserový systém zapalování. Motor se nejprve provozoval s běžným jiskrovým zapalováním. Zapalovací systém se použil Altronic CD200, se kterým se při experimentu řídilo časování zážehu. Jako snímač pro řízení systému zapalování se použil magnetický snímač instalovaný na vačkovém hřídeli.

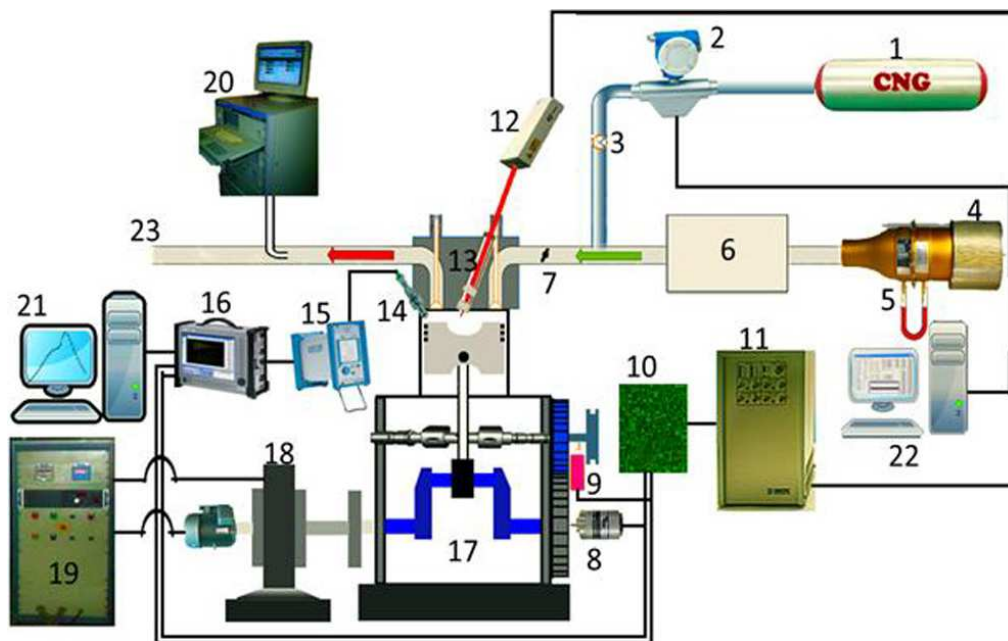
Pro laserové zapalování byl použit Nd:YAG laser s Q-spínáním pracující na vlnové délce 1 064 nm s dobou trvání impulzu 6 – 9 ns. Laserový zapalovací modul (zkráceně laserový modul) byl instalován v hlavě válce namísto klasické zapalovací svíčky. Laserový modul se skládá z dvou částí: držáku okna a držáku čočky. Samotná čočka by nevydržela drsné podmínky panující ve spalovací komoře, proto se používá safírové okno (silné 3 mm, o průměru 12,5 mm), které je schopno účinně chránit čočku před poškozením. Ohnisková vzdálenost čočky zaostření laserového paprsku je 30 mm. Laser je tak jako u předchozího experimentu s propanem zaostřen ve stejné vzdálenosti, jako má zapalovací svíčka elektrody. Je to z důvodu porovnatelnosti obou dvou variant mezi sebou. Pro laserové zapalování je upraven řídicí systém předstihu zážehu.

Tlakové změny se ve válci měřily piezoelektrickým snímačem tlaku (Kistler, 6013C), který byl nainstalovaný v hlavě motoru. Signál ze snímače tlaku byl zesílen a převeden na napěťový signál pomocí nábojového zesilovače (Kistler, 5015). Získané signály se zpracovávaly vysokorychlostním systémem sběru dat (hi-technik meDAQ). Emise z výfuku motoru se měřily v surovém stavu pomocí analyzátoru emisí

výfukových plynů (Horiba, EXSA-1500). Veškeré experimenty se prováděly za konstantních otáček motoru ($1\,500\text{ min}^{-1}$) při plném přívodu plynu. U klasických zapalovacích svíček se měnila λ od 1,35 do 0,9 a předstih zážehu v rozmezí od 17 do 37 °KH.

Maximální brzdící moment (MBM) byl stanoven pro různé hodnoty λ . Na základě MBM pro zapalovací svíčku a laserové zapalování byly porovnány pro tři předstihy zážehu: 21, 25 a 29 °KH. Výfukové emise spalovacího motoru a výkon byly měřeny pro každý bod předstihu zážehu a λ , které byly následně porovnány mezi oběma variantami zapalování.

Pro lepší pochopení celého systému je určen obr. 34, kde jsou názorně ukázány všechny součásti potřebné k experimentu.



Obr.34: Experimentální uspořádání pro laserový zapalovací systém: [13]

1 – tlaková nádrž na CNG, 2 – měřič hmotnostního toku CNG, 3 – redukční ventil průtoku CNG, 4 – laminární prvek, 5 – U trubicový manometr, 6 – filtr vzduchu, 7 – škrtecí klapka, 8 – snímač otáček klikového hřídele, 9 – snímač horní úvratě, 10 – spouštěcí obvod laseru, 11 – napájení laseru, 12 – Nd:YAG laser, 13 – laserový modul, 14 – piezoelektrický snímač tlaku, 15 – napěťový zesilovač, 16 – vysokorychlostní systém sběru dat, 17 – jednoválcový motor, 18 – dynamometr využívající vířivých proudů, 19 – regulátor dynamometru, 20 – Analyzátor surových emisí výfukových plynů, 21 – datová sběrnice, 22 – počítač řídící průtokoměr CNG a zapalování, 23 – výfukové potrubí

8.7.2. Výsledky měření

Na experimentu byly ukázány rozdíly v talcích ve válci a rychlostech uvolňování tepla v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele pro zapalovací svíčku a laserové zapalování při různém λ . Pro analýzu tlaku ve válci v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele byly použity soubory dat ze 100 po sobě jdoucích cyklů. Ohnisko laserového paprsku bylo udržováno ve stejné vzdálenosti jako elektrody zapalovací svíčky. Přesněji řečeno, laser byl zaměřen do stejného místa, kde vznikala plazma u zapalovací svíčky. Předstih zážehu byl stanoven na 25 °KH u obou variant zapalování.

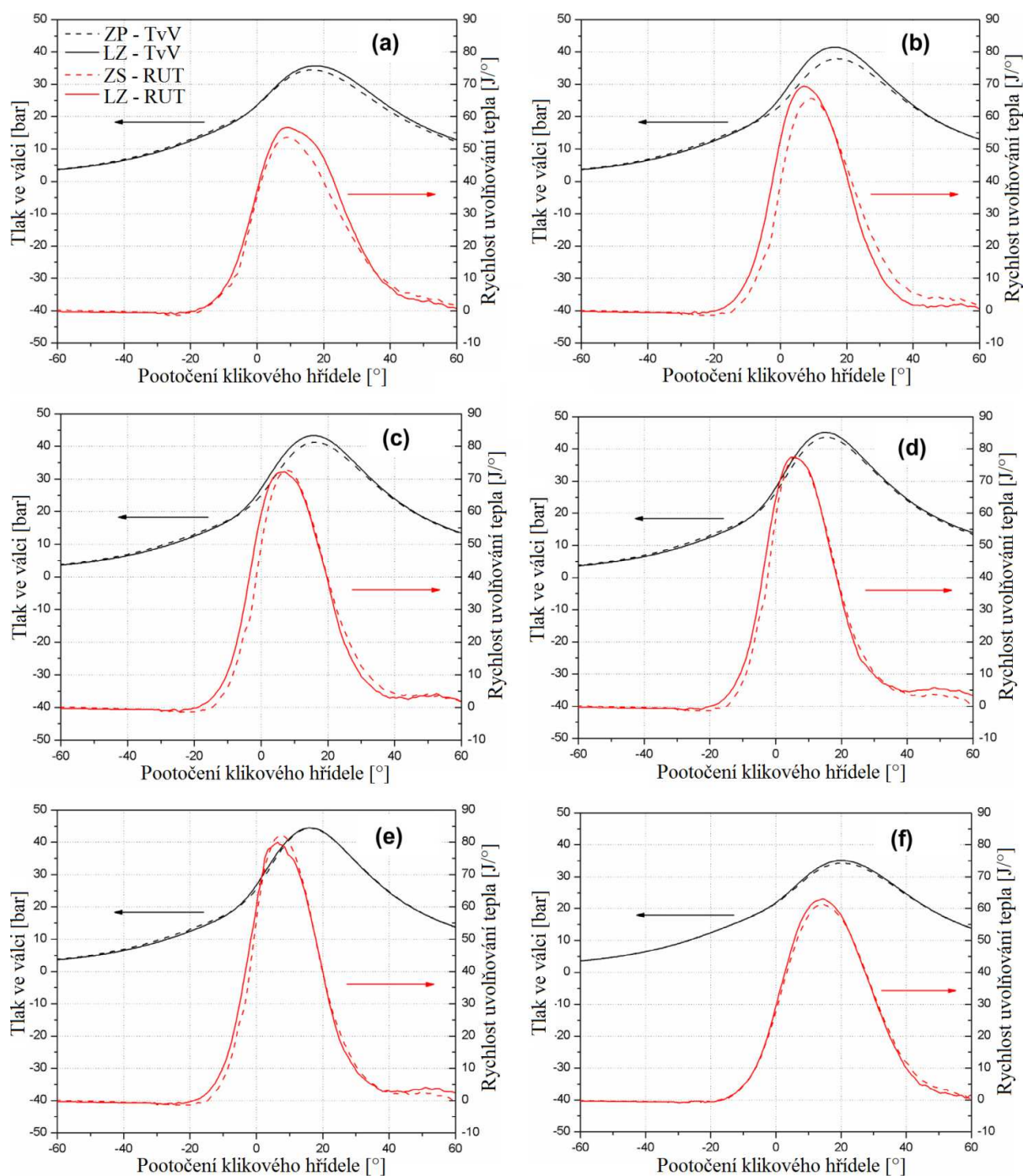
Na obr. 14 je ukázáno, že maximální tlak ve válci a rychlost uvolňování tepla se zvyšuje s klesající λ jak u zapalovací svíčky, tak i u laseru. Při $\lambda < 1$ se maximální tlak ve válci i rychlost uvolňování tepla snížila. Oproti stechiometrické směsi, kde byl tlak ve válci 44,3 bar při 16,5 °KH za horní úvratí, se tlak ve válci s $\lambda = 1,35$ snížil na 34,5 bar při stejném natočení KH. Při zapalování zapalovací svíčkou se maximální tlak ve válci zvýšil z 34,5 bar v 16,5 °KH za horní úvratí při $\lambda = 1,35$ oproti 44,3 bar v 16,5 °KH za horní úvratí pro stechiometrickou směs. Maximální rychlost uvolňování tepla se zvýšila z 53,6 J/° při 9,5 °KH za horní úvratí pro $\lambda = 1,35$ až po 82 J/° a 8 °KH za horní úvratí pro stechiometrickou směs. Zatímco u zapalování laserem se pro stechiometrickou směs snížil maximální tlak ve válci ze 44,5 bar při 16 °KH za horní úvratí na 35,7 bar a 17,5 °KH za horní úvratí s $\lambda = 1,35$. Maximální rychlost uvolňování tepla se zvýšila z 56,6 J/° v 9 °KH za horní úvratí pro $\lambda = 1,35$ na 80 J/° v 6,5 °KH za horní úvratí u stechiometrické směsi.

Tento trend pro maximální tlak ve válci v závislosti na pootočení klikového hřídele přímo souvisí s rychlostí šíření plamene a účinností spalování. Rychlost plamene se tedy zvyšuje z bohatostí směsi, nejvyšší rychlost plamene byla pozorována u směsi s $\lambda = 0,9$. S dalším obohacováním směsi rychlost klesá. Při vyšších λ bylo spalování omezeno nižší dodávkou paliva a při nižších λ se spalování omezovalo nižší dodávkou vzduchu.

Z obr. 35 je také vidět, že maximální tlak ve válci byl nepatrně vyšší u laserového zapalování než u zapalovací svíčky. Při $\lambda = 1,2$ je maximální tlak ve válci u laserového zapalování 41,5 bar, zatímco u zapalovací svíčky je jen 39,9 bar. Úhel pootočení klikového hřídele při maximálním tlaku válce bylo 16 °KH za horní úvratí pro laserové zapalování a pro zapalovací svíčku 17,5 °KH za horní úvratí. Vyšší maximální tlaky ve válci byly pozorovány u laserového zapalování nežli u zapalovací

svíčky, a to při stejných provozních podmínkách motoru. Ovšem u stechiometrické směsi a i u $\lambda = 0,9$ jsou tlaky v podstatě podobné. Rychlost uvolňování tepla byla taktéž vyšší u laserového zapalování než u zapalovací svíčky. Laserové zapalování vedlo ke vzniku rychlejšího zapálení směsi oproti zapalovací svíčke, což mělo za následek vyšší tlak ve válci, a to zejména maximální tlak u chudých směsí.

Stejně testy proběhly pro předstihy zážehu 21 °KH a 29 °KH. U těchto předstihů zážehů se charakteristiky oproti výše uvedeným výsledkům neměnily. Maximální tlak ve válci a rychlost uvolňování tepla se zvyšovaly s výše uvedenými předstihy zážehu. Bylo také zjištěno, že maximální tlak a rychlost uvolňování tepla klesají při přibližování předstihu zážehu k horní úvrati. Zjištěné vyšší tlaky ve válci a rychlost uvolňování tepla u laserového zapalování ve srovnání se zapalovací svíčkou jsou nejspíše důsledkem toho, že laser dokáže směs paliva zažehnout dříve.



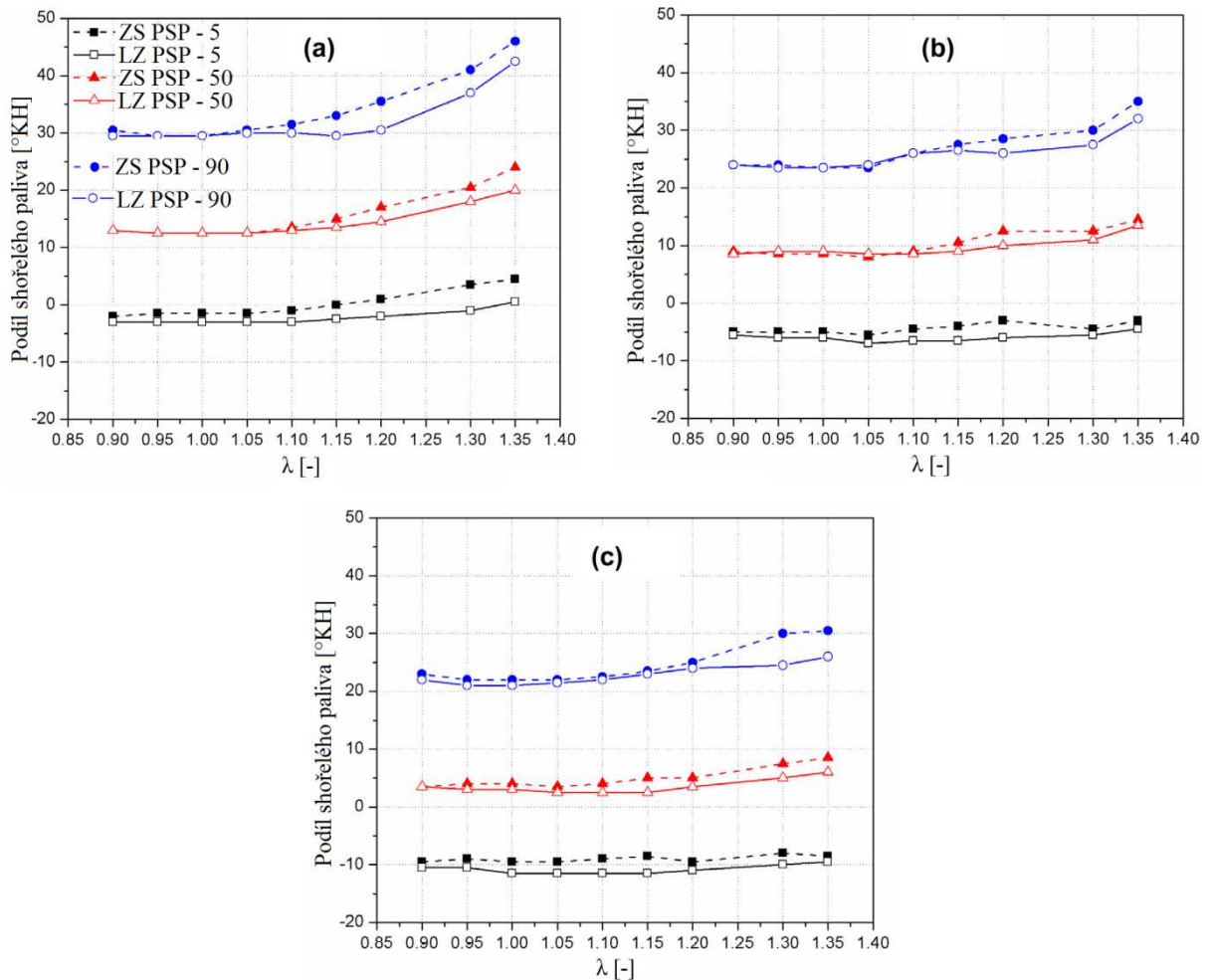
Obr.35: Srovnání tlaku ve válci a rychlosti uvolňování tepla pro laserové zapalování a zapalovací svíčku v závislosti na pootočení klikového hřídele, s předstihem zážehu 25°KH a různými λ a) - $\lambda = 1,35$, b) - $\lambda = 1,2$, c) - $\lambda = 1,15$, d) - $\lambda = 1,1$, e) - $\lambda = 1$, f) - $\lambda = 0,9$ [15]

K charakterizaci různých fází spalování se často používá podíl shořelého paliva (PSP, anglická zkratka MBF). Jednotlivé fáze hoření byly vypočteny z křivek PSP. Obr. 36 ukazuje různé fáze spalování pro laserové zapalování a zapalovací svíčku s různou

hodnotou λ a měnícím se předstihem zážehu v hodnotách 21 °KH (obr. 36 a), 25 °KH (obr. 36 b) a 29 °KH (obr. 36 c). Podíly shořelého paliva jsou udávány 5 %, 50 %, a 90 %, což na obr. 36 je popsáno jako PSP – 5, PSP – 50 a PSP – 90. Začátek spalování je definován jako čas, kdy se spálí malý podíl ze směsi paliva a vzduchu. Výzkumníci používali pro definování začátku spalování buď 1 %, nebo 5 %, nebo 10 % PSP. Konečným usnesením o „začátku hoření“ byla brána hodnota PSP – 5. Konec hoření je brán jako stav, kdy je převážná část paliva už spálena. Pro „konec hoření“ byla vzata hodnota PSP – 90 v rámci daného výzkumu.

To, že spalování začíná dříve u laserového zapalování než u zapalovací svíčky, je patrné z obr. 36., a to pro všechny λ i předstihy zážehu. Dřívější začátek spalování u laserového zapalování nastal o 1 – 4 °KH dříve než u zapalovací svíčky. Zpoždění zapálení směsi je definováno jako interval mezi úhlem pootočení klikového hřídele, mezi jiskrovým výbojem a začátkem spalování. To bude nižší i pro laserové zapalování ve srovnání se zapalovací svíčkou kvůli dřívějšímu začátku spalování pro shodné časy předstihu zážehu. U PSP – 50 a PSP – 90 bylo zjištěno, že laserové zapalování směs zapálí dříve, ale v některých případech se téměř shodovalo se zapalovací svíčkou. Mimo PSP – 5 se rychlost spalování snižuje z klesající λ .

Dřívější začátek spalování může být vysvětlen na základě absorpční energie mechanismů laseru a vytvořené plazmy. Existuje zásadní rozdíl ve způsobu laserem generované plazmy pohlcující energii ve srovnání s plazmou vytvořené jiskrou zapalovací svíčkou. Optická frekvence laserového paprsku je vyšší než frekvence samotné plazmy, tedy laserový paprsek je schopen se dobře šířit do vnitřku plazmy, kde je silně absorbován v blízkosti ohniska. Běžné elektrické zapalovací systémy pracují na frekvenci nižší, než je frekvence plazmy, tím se plazma udržuje absorbováním pouze na tenké vrstvě jejího povrchu. Teplota plazmy generovaná laserem je v řádu 10^6 K a tlaku 10^3 bar, naproti tomu plazma generované běžnou elektrickou zapalovací svíčkou má teplotu v řádech 10^4 K a tlak několika stovek bar. Z toho je vidět, že laserem generující plazma má přibližně o dva řády vyšší teplotu a o řád vyšší tlak, než je tomu u běžné zapalovací svíčky. Dalším rozdílem mezi laserovým zapalováním a zapalovací svíčkou je rychlost přenosu energie v plazmě. Energie se přenáší u laserového zapalování v řádu nanosekund, zatímco u zapalovací svíčky je tomu v řádu mikrosekund. Z důvodu rychlého přenosu energie, vysoké teploty a tlaku probíhá spalování u laseru dříve.



Obr.36: Srovnání podílů shořelého paliva PSP – 5, PSP – 50, PSP – 90 pro laserové zapalování a zapalovací svíčku, a) – 21 °KH, b) – 25 °KH, c) – 29 °KH [15]

Na obr. 37 je znázorněna změna maximálního tlaku ve válci s ohledem na tři různé předstihy zážehu u obou variant zapalování. Zde si lze povšimnout, že maximální tlak ve válci se zvyšuje s klesající λ , nicméně jak se stane směs bohatší, maximální tlak ve válci začne opět klesat. Tento trend je stejný u všech předstihů zážehu.

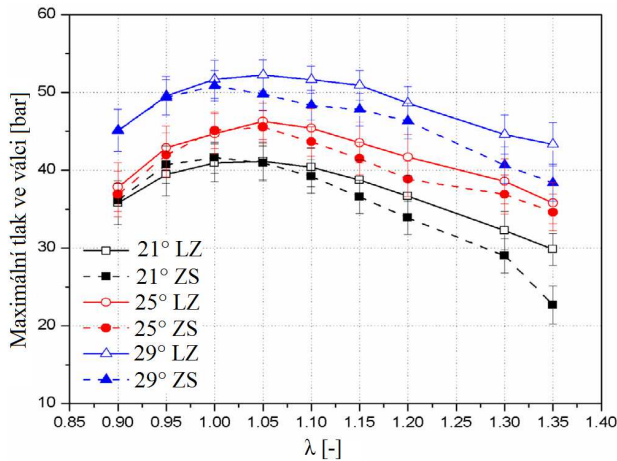
Maximální tlak ve válci pro laserové zapalování se zvýšil z 29,8 bar až na 41 bar, kdy λ měla hodnotu 1,35 a 1,05 při předstihu zážehu 21 °KH, dále tlak klesal až na hodnotu 35,8 bar při $\lambda = 0,9$. U bohatších směsí se maximální tlak dále nezvyšoval, protože dochází k nedokonalému spalování. Maximální tlak ve válci se také postupně zvyšuje s rostoucí hodnotou předstihu zážehu. Vyšší množství paliva se spaluje relativně dříve s rostoucí hodnotou předstihu zážehu před tím, než píst dosáhne horní úvratě. V případě, že začátek spalování je v důsledku zpoždění časování zážehu opožděn, dochází k pozdější expanzi, a proto je tlak relativně nižší.

Bylo tedy zjištěno, že maximální tlak u laserového zapalování je vyšší ve srovnání se zapalovací svíčkou. Rozdíly v tlacích byly významné hlavně v oblasti chudých směsí, naproti tomu u bohatých směsí se tlaky mezi oběma variantami zapalování téměř nelišily. Variabilita cyklu v zážehovém motoru zůstává limitujícím faktorem pro jeho funkci, spotřebu paliva, emise i samotnou zapalovací svíčku. Vzhledem k cyklickým změnám jednotlivých cyklů dochází k snižování účinnosti spalování, což má za následek nepříznivý dopad na celkovou tepelnou účinnost, stejně tak i na emise.

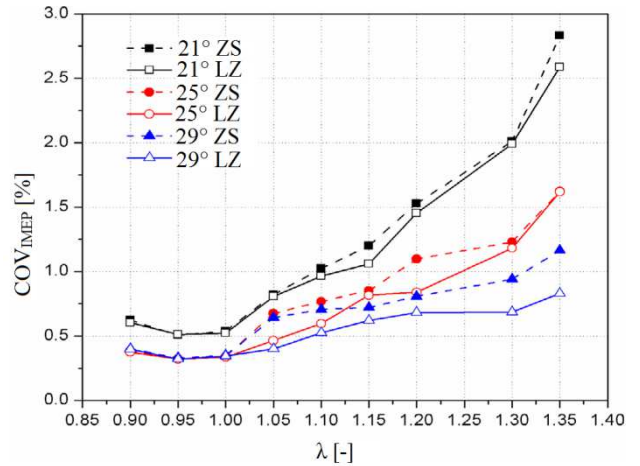
Rozdílné spalování vede k rozdílným pracovním výkonům na jednotlivé cykly, které můžou souviset s kolísáním otáček a točivého momentu, to následně vede k přímému dopadu na jízdní vlastnosti vozidla. Cyklické změny jsou velkým problémem u chudé směsi, proto se tyto změny zkoumaly u laserového zapalování a porovnávaly se zapalovací svíčkou.

Žádoucí je nižší COV_{IMEP} , čímž se sníží cyklické změny, a to přispívá k hladkému chodu motoru. Obr. 2 znázorňuje změnu COV_{IMEP} pro laserové zapalování ve srovnání se zapalovací svíčkou pro různá λ a různé předstihy zážehu. Je třeba poznamenat, že COV_{IMEP} (viz obr. 38) klesá s klesající λ pro všechny předstihy zážehu. Při $\lambda = 1,35$ a předstihu zážehu $21^\circ KH$ činila hodnota COV_{IMEP} 2,83 % pro zapalovací svíčku a 2,58 % u laserového zapalování. Nižší hodnota COV_{IMEP} u laserového zapalování oproti zapalovací svíčce je pozorovatelná pro všechny předstihy zážehu i pro různé hodnoty λ . To znamená, že cyklické změny v jednotlivých cyklech jsou u laserového zapalování nižší ve srovnání se zapalovací svíčkou. To je možné pravděpodobně v důsledku řízeného ukládání energie v laserem vytvořeném plazmatu a absenci zhášejícího účinku plamene u laserového zapalování.

Při zkouškách byl zjišťován vliv energie laserového pulzu na stabilitu spalování. Jak již bylo uvedeno, existují rozdíly v mechanismu absorpce energie v plazmě u laserového zapalování a u zapalovací svíčky. Jakmile se vytvoří plazma, začne silně pohlcovat dopadající energii laserového pulzu. Ovšem existuje určitá prahová hodnota hustoty energie pro pevnou ohniskovou vzdálenost, za kterou laserový pulz má malou nebo žádnou energii. Proto je třeba pro vývoj budoucích laserových zapalovacích systémů zajistit co nejvyšší energii laserového pulzu tak, aby se dosáhlo co nejvyšší stability spalování a optimálního výkonu motoru.

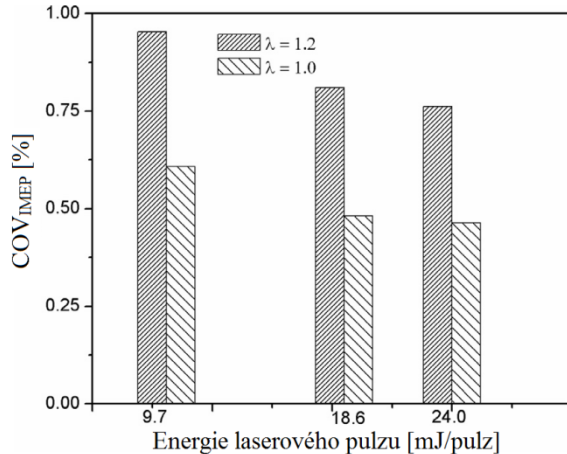


Obr.37: Změna maximálního tlaku ve válci s měnící se λ a předstihem zážehu [15]



Obr.38: Změna COVIMEP s měnící se λ a předstihem zážehu [15]

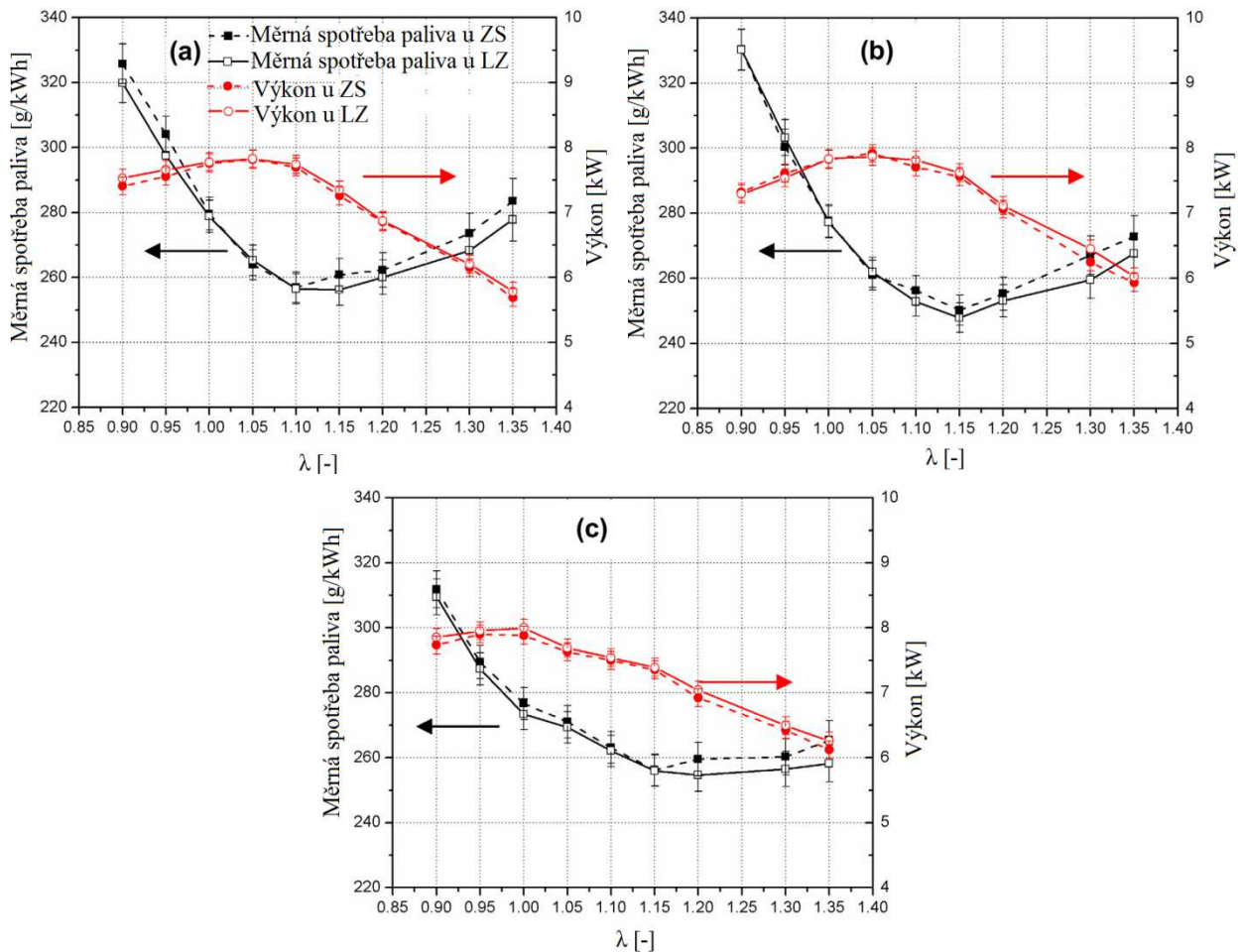
Na obr. 39 je znázorněna změna COV_{IMEP} na energii laserového pulzu při $\lambda = 1,2$ a $\lambda = 1$ s předstihem zážehu 25 °KH. COV_{IMEP} klesá od 0,95 do 0,77 % při $\lambda = 1,2$ a u $\lambda = 1$ hodnoty klesají od 0,6 do 0,46 %. Energie laserového pulzu je 9,7 mJ, 18,6 mJ a 24 mJ. Z toho plyne, že větší stabilita spalování roste s energií laserového pulzu.



Obr.39: Změna COVIMEP pro různé energie laserového pulzu při $\lambda = 1,2$ a $\lambda = 1$ [15]

Pro laserové zapalování a zapalovací svíčku byly dále experimentálně zjištěny výkonnostní parametry motoru, jako je výkon a měrná spotřeba paliva (m_{pe}). Výkon motoru je ukazatelem schopnosti motoru přeměnit chemickou energii paliva na užitečný mechanický výkon. Obr. 40 ukazuje změnu výkonu motoru, měrné spotřeby paliva a součinitel přebytku vzduchu u laserového zapalování a zapalovací svíčky pro tři různé předstihy zážehu. Výkon se zvyšuje s klesající λ až do hodnoty $\lambda = 1,05$ (předstih

zážehu 21 °KH a 25 °KH) a $\lambda = 1$ (předstih zážehu 29 °KH), kdy má výkon maximální hodnotu. Při dalším snižování λ směsi výkon klesá. Téměř ve všech zkoumaných podmínkách (viz obr. 40) bylo pozorováno, že laserové zapalování je lepší než zapalovací svíčka, a to jak ve zvýšeném výkonu, tak nižší měrné spotřebě paliva. Tyto hodnoty jsou příčinou účinnějšího spalování pomocí laserového zapalování, jak už bylo ukázáno na obr. 35.



Obr.40: Měrná spotřeba paliva a výkonu v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ pro tři předstihy zážehu. a) - 21 °KH, b) - 25 °KH, c) - 29 °KH [15]

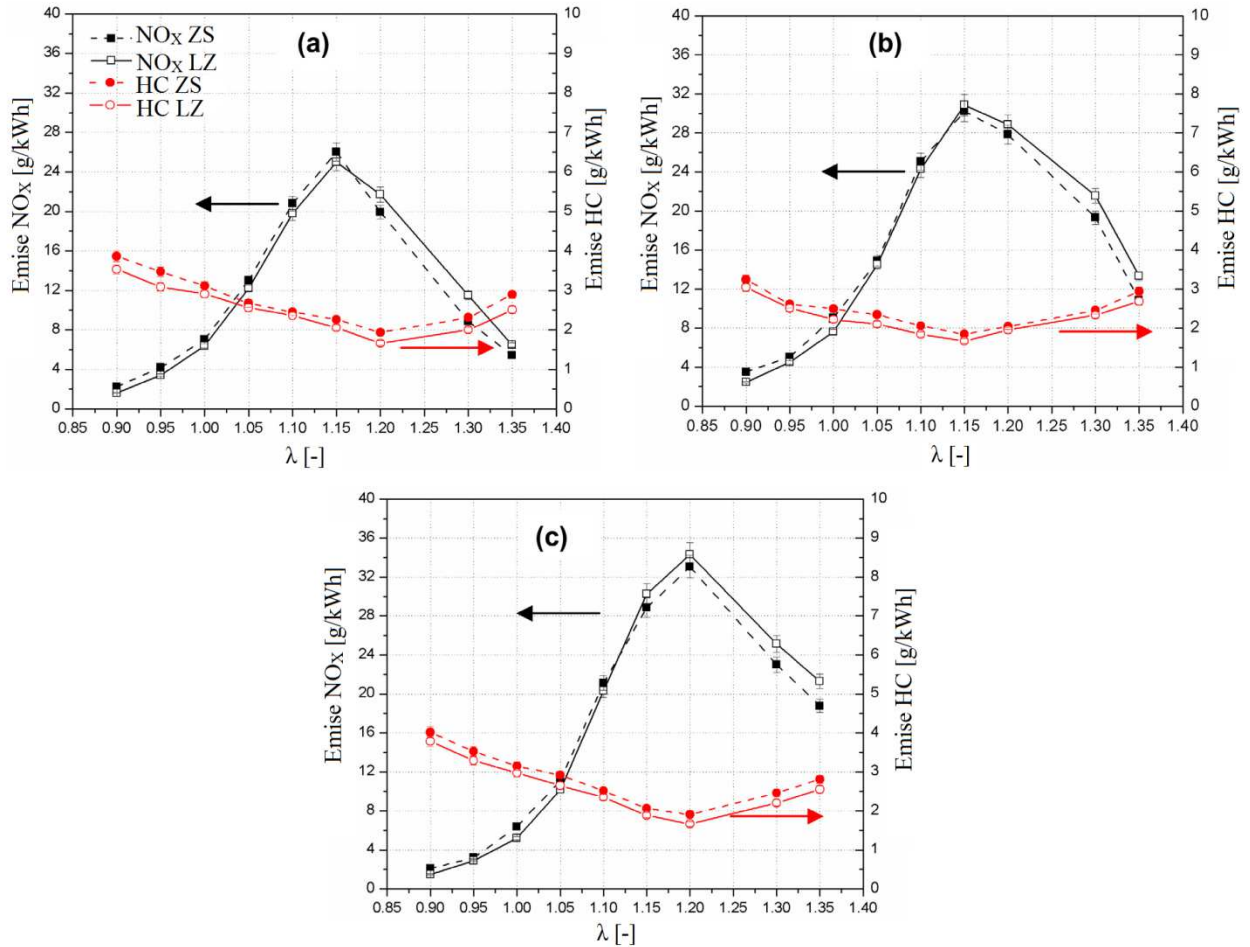
Měrná spotřeba paliva se snižuje s klesající λ až do svého minima, kde naopak s dalším snižováním λ měrná spotřeba paliva stoupá. Tento průběh je znatelný zejména v předstihu zážehu 21 °KH a 25 °KH. Se zvyšující se λ , kdy směs začíná být chudá, dochází ke snižování výkonu motoru. U bohatých směsí dochází k nárůstu výkonu, nicméně s dalším obohacováním směsi výkon motoru klesá. Nejnižší měrná spotřeba

paliva byla pozorována u předstihu zážehu 25 °KH pro laserové zapalování, tak i pro zapalovací svíčku. Relativně nižší měrná spotřeba paliva je u laserového zapalování pro $\lambda > 1,1$, ale pro $\lambda < 1,1$ je rozdíl mezi laserovým zapalováním a zapalovací svíčkou minimální, zejména u předstihu zážehu 25 °KH (viz obr. 40 b).

U laserového zapalování a zapalovací svíčky byly dále zkoumány výfukové emise. Obr. 9 ukazuje produkci NO_x (oxidy dusíku), HC (uhlovodíky) v závislosti na λ pro tři různé předstihy zážehu. Složení oxidů dusíku v emisích výfukových plynů představují oxid dusnatý (NO) a oxid dusičitý (NO₂) souhrnně označovány jako NO_x. Hlavní složkou NO_x u zážehových motorů je oxid dusnatý, zbývající objem zahrnuje NO₂ s 1 – 2 % z celkového množství NO_x, zatímco u vznětových motorů zahrnuje celkový objem NO₂ v NO_x 10 – 30 % v závislosti na otáčkách a zatížení motoru. Hlavním zdrojem vzniku NO v procesu spalování ve válci motoru je oxidace vzdušného dusíku za vysokých teplot. Dalším zdrojem je dusík obsažený v palivu, to může být patrné z obr. 41, kde se NO_x zvyšuje s klesajícím λ , až dosáhne svého maxima. Poté se opět snižuje s klesajícím λ . Tento průběh je shodný pro všechny předstihy zážehu.

Tvorba NO_x uvnitř spalovacího prostoru je velice závislá na spalovací teplotě směsi na čele plamene u zapalovací svíčky, kde atmosférický dusík oxiduje za vzniku oxidů dusíku. Nejvyšších teplot spalování se dosahuje u mírně bohatých směsí, kde je nízký obsah kyslíku ve směsi. Jak se ovšem směs stává chudší, objem kyslíku je vyšší a spalovací teploty klesají. Proto se vyskytují maximální hodnoty emisí NO_x u mírně chudých směsí (viz obr. 41). Na tvorbu NO_x má také vliv předstih zážehu. Maximální hodnoty NO_x se postupně zvyšovaly z 26 g/kWh do 34 g/kWh s rostoucím předstihem zážehu. Zvyšování předstihu zážehu mělo za následek zvyšování maximálního tlaku ve válci a teploty, protože spalování začalo o něco dříve a tím bylo více tepla vydáno před a kolem horní úvratě. Emise NO_x byly nejvyšší u laserového zapalování až do $\lambda = 1,15$. S dalším snižováním λ se emise NO_x u laserového zapalování a zapalovací svíčky prakticky shodovaly. Vyšší produkci NO_x u laserového zapalování lze vysvětlit rychlejším začátkem spalování, než je tomu u zapalovací svíčky.

Emise HC klesají se snižujícím λ až do svého minima a s následným dalším obohacováním směsi začínají růst, což je stejné jak u laserového zapalování, tak u zapalovací svíčky. Tento průběh byl stejný u všech předstihů zážehu (obr. 9). Minimální hodnoty HC se vyskytovaly u $\lambda = 1,2$; 1,15 a 1,2 pro předstihy zážehu 21 °KH, 25 °KH a 29 °KH. Emise HC byly nižší u laserového zapalování pravděpodobně z důvodů vyšší účinnosti spalování.

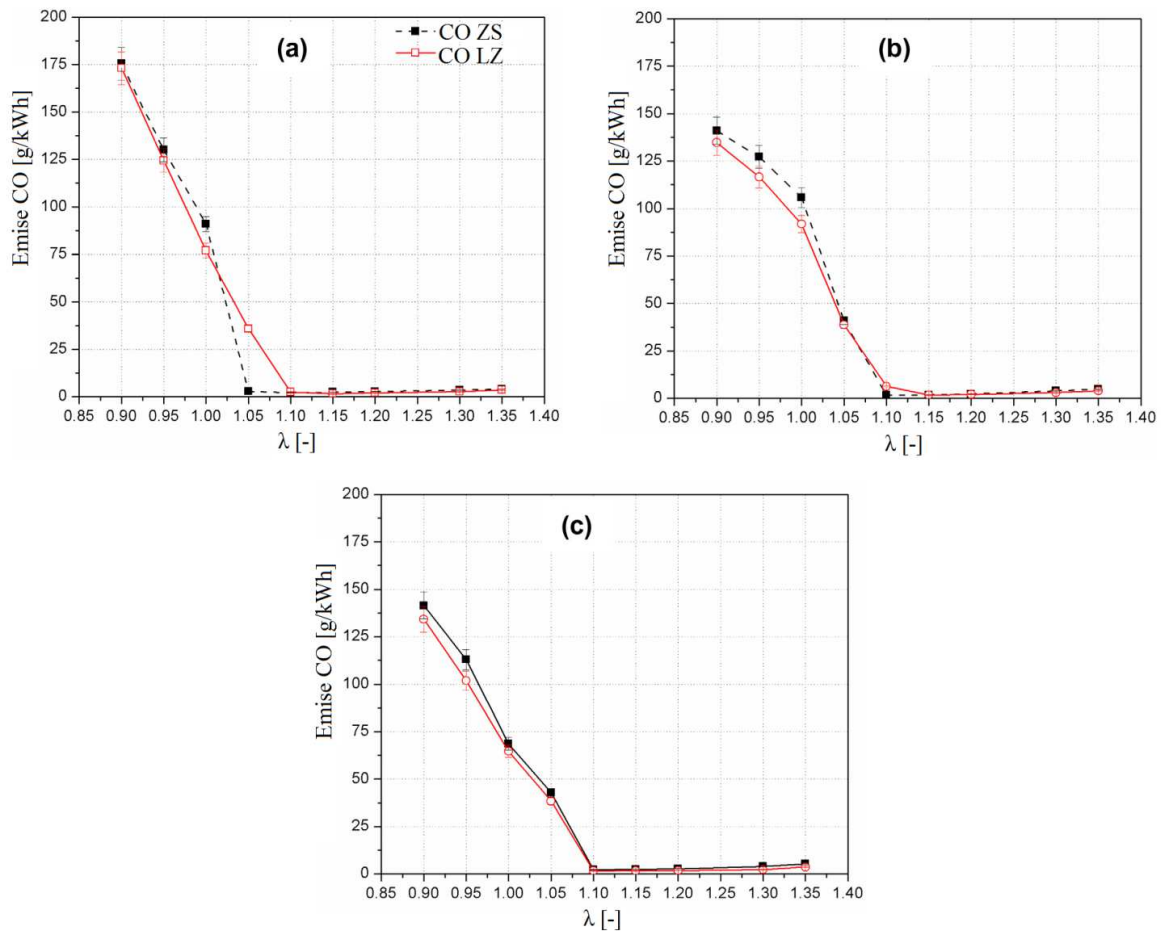


Obr.41: Emise NO_x a HC v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ pro tři předstihy zážehu. a) - 21 °KH, b) - 25 °KH, c) - 29 °KH [15]

Na obr. 42 je srovnání produkce emisí oxidu uhelnatého (CO) u laserového zapalování a zapalovací svíčky pro různé λ a tři různé předstihy zážehu. Zážehový motor pracuje v režimu stechiometrické nebo mírně bohaté směsi většinu času v celém provozním rozsahu motoru, a proto jsou emise CO velice významné. Emise CO jsou přímou funkcí λ a nelze je nijak zvlášť snížit změnou konstrukce motoru nebo jeho seřazením.

Jak je ukázáno na obr. 42, emise CO jsou v oblasti chudých směsí ($\lambda > 1,1$) poměrně malé. Pro směsi bohatší ($\lambda < 1,1$) naopak emise CO postupně rostou se snižující se λ . U chudých směsí dochází ve spalovací komoře k oxidaci CO na CO_2 , ovšem část CO v důsledku omezených reakčních rychlostí zůstává ve výfukových plynech. Pro bohaté směsi se emise CO zvyšují rychleji, protože s vyšší mírou probíhá nedokonalé spalování ve válci. Emise CO byly nepatrně nižší u laserového zapalování ve srovnání se zapalovací svíčkou u $\lambda = 1,35$ a předstihu zážehu 21 °KH, 25 °KH

a 29 °KH. Důvodem nepatrného snížení CO je efektivnější spalování u laserového zapalování, než je tomu u zapalovací svíčky.



Obr.42: Emise CO v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ pro tři předstihy zážehu. a) - 21 °KH, b) - 25 °KH, c) - 29 °KH [15]

8.7.3. Vyhodnocení měření

Srovnání laserového zapalování se zapalovací svíčkou bylo provedeno na jednoválcovém motoru pro různé hodnoty λ a tři různé předstihy zážehu. Na základě srovnání bylo zjištěno, že maximální tlak ve válci a rychlost uvolňování tepla byly nepatrně vyšší u laserového zapalování než u zapalovací svíčky. Vyšší tlak ve válci u laserového zapalování je v důsledku rychlejšího zapálení směsi. Dalším zlepšením oproti zapalovací svíčce bylo zkrácení doby předstihu zážehu o 1 až 4 °KH, menší odchylky zapalování cyklu od cyklu, menší zmenšení výkonu, snížení měrné spotřeby a snížení emisí HC a CO. Jediným přímým negativem bylo zvýšení emisí NO_x oproti zapalovací svíčce.

9. Funkční vzorek motoru s laserovým zapalováním

Výrobce plynových motorů TEDOM, a.s., divize Motory má záměr vyzkoušet možnost náhrady stávajícího indukčního zapalování se zapalovací svíčkou u průmyslového motoru na zemní plyn zapalováním laserovým.

Pro instalaci funkčního vzorku laserového zapalování byl vybrán průmyslový přeplňovaný plynový motor na zemní plyn TEDOM TG 210 G5V TW 86 získaný rekonstrukcí řadového šestiválcového vznětového motoru na motor zážehový. Hlavní parametry motoru uvádí tabulka 2.

Průmyslový plynový motor TEDOM TG 210 G5V TW 86	
Jmenovitý výkon	210 kW
Jmenovité otáčky	1500 min ⁻¹
Kompresní poměr ϵ	12:1
Turbodmychadlo	ČZ 4067 B17.23S
Chladič vzduchu	MODINE dvoustupňový
Plynová palivová příslušenství	Woodward, Heinzmann
Zapalování	BOSCH
Zapalovací svíčky	Denso GK3-5
Hodinová spotřeba plynu	38,5 kg·h ⁻¹
Měrná spotřeba plynu	183,3 g·kWh ⁻¹
Součinitel přebytku vzduchu λ	1,62
Emise CO při 5 % O ₂	650 mg·N ⁻¹ ·m ⁻³
Emise NO _x při 5 % O ₂	500 mg·N ⁻¹ ·m ⁻³

Tab. 2: Parametry plynového motoru TEDOM

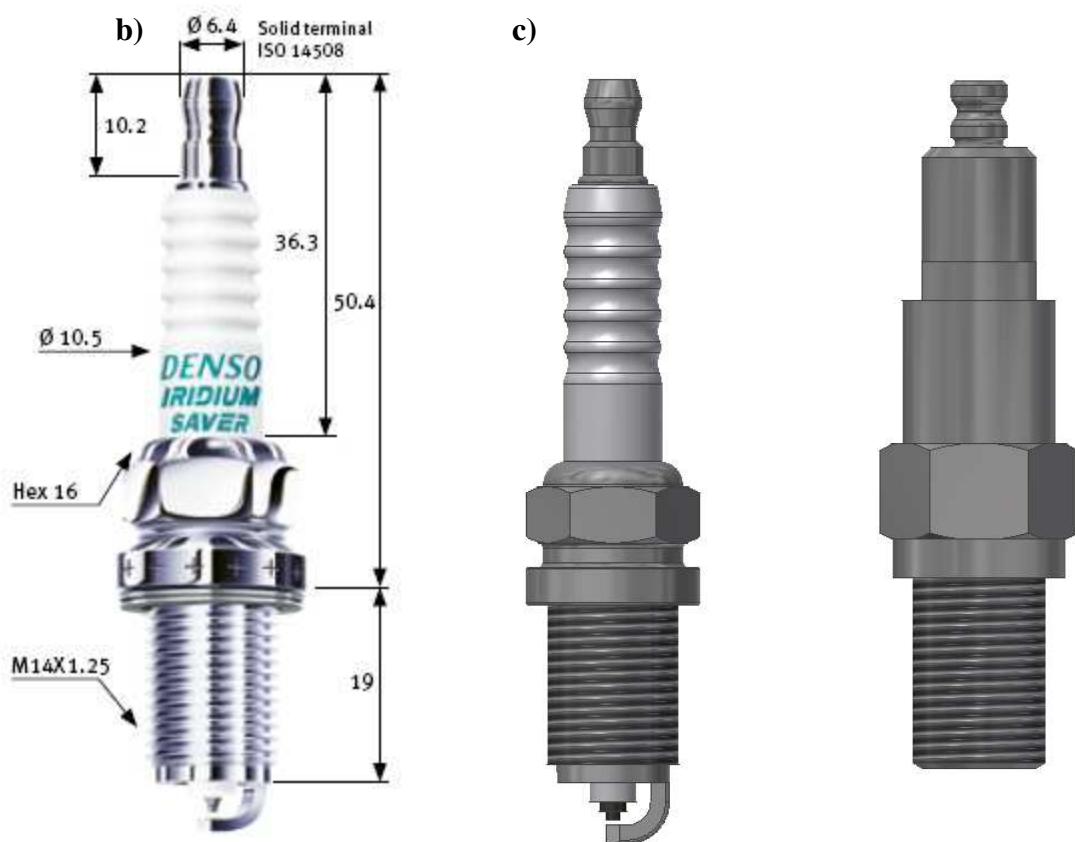
9.1. Úprava hlavy válců pro laserový zapalovací modul a zvýšení kompresního poměru motoru

Zapalovací svíčky v hlavách válců budou nahrazeny laserovými zapalovacími moduly, jak ukazuje obr. 43. Výkres hlavy válců upravené pro instalaci zapalovacího laserového modulu DENSO je v příloze 2, výkres pístu pro kompresní poměr motoru 12,5:1 je v příloze 1.

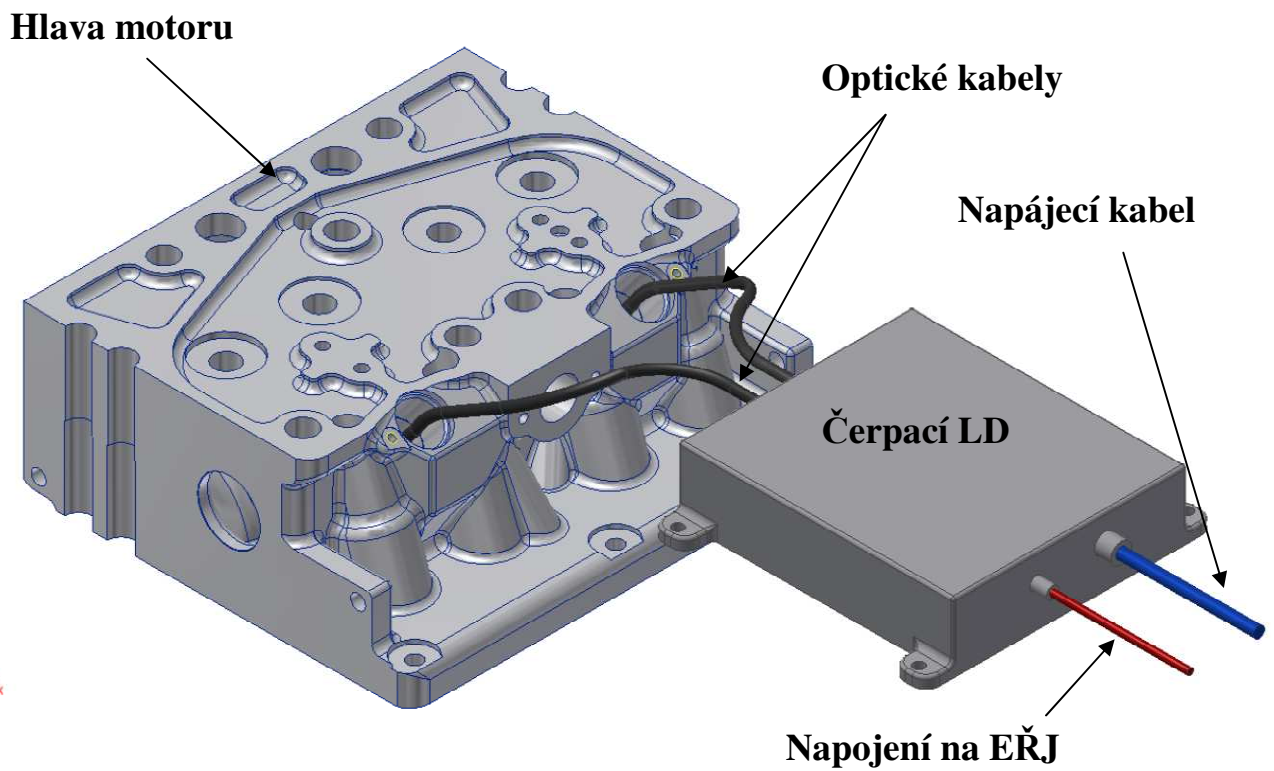
Modul se závitem M 14x1,25 lze upevnit do hlavy válců motoru obdobně jako

zapalovací svíčku. Má podobně stejné kompaktní rozměry a navíc upevňovací závit a šestihránná hlava pro montáž jsou shodné se zapalovací svíčkou (viz obr. 43).

Lze si všimnout, že laserový modul je kratší, a to zejména pro absenci uzemňovací a středové elektrody. Tyto chybějící části, které definují přesné místo zážehu směsi paliva, nikterak nevadí laserovým modulům. Ty budou vloženy pouze do mírně upravené hlavy válců (obr. 46), tak aby byly blíže spalovacímu prostoru. Laserový paprsek lze díky vnitřní optice modulu zaostřit do požadovaného místa zážehu.



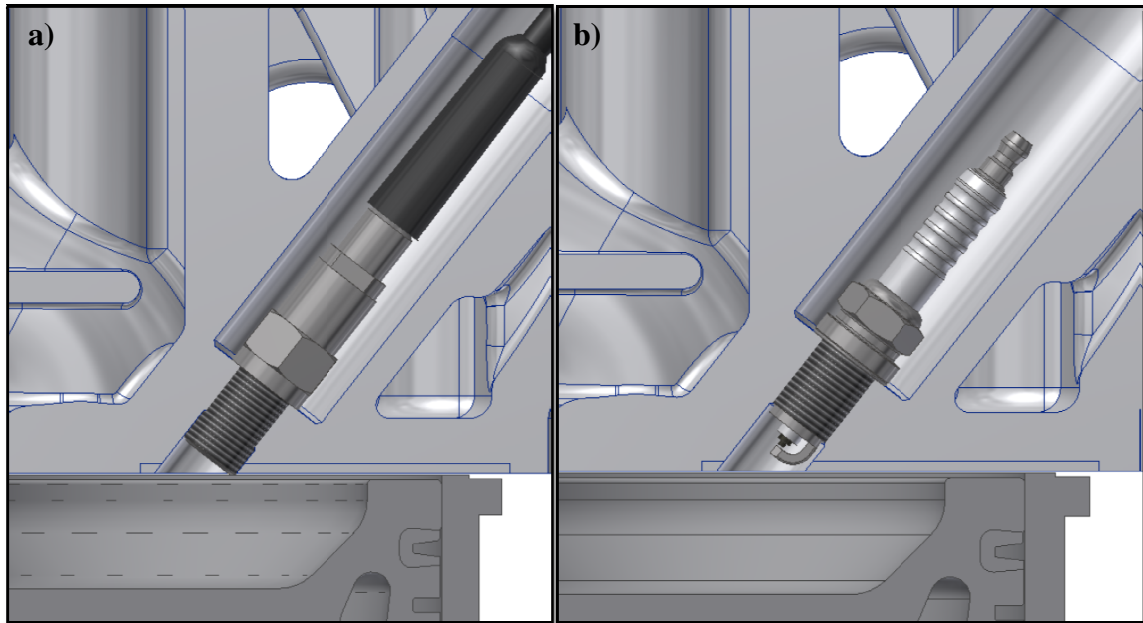
Obr.43: a) - zapalovací svíčka Denso GK3-5 [16], b) - 3D model zapalovací svíčky Denso GK3-5, c) - 3D model laserového modulu Denso



Obr.44: Model hlavy motoru TEDOM (pro dva válce) s laserovým zapalováním
 a) – laserový modul, b) – zapalovací svíčka

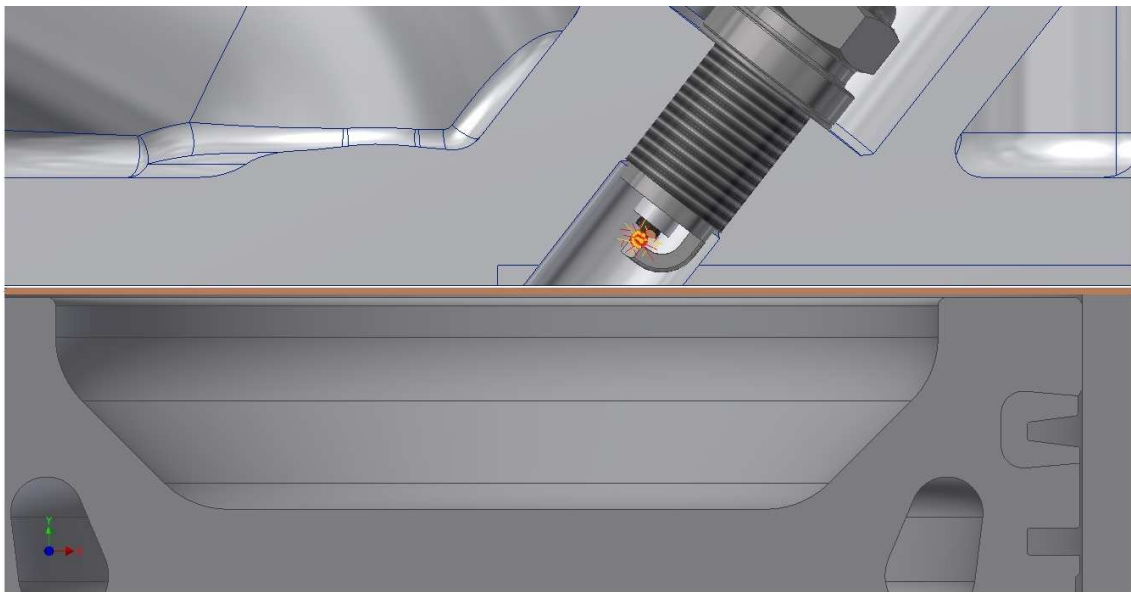


Obr.45: Čerpací LD s šestí vývodů pro optické kabely k šestiválcovému motoru TEDOM

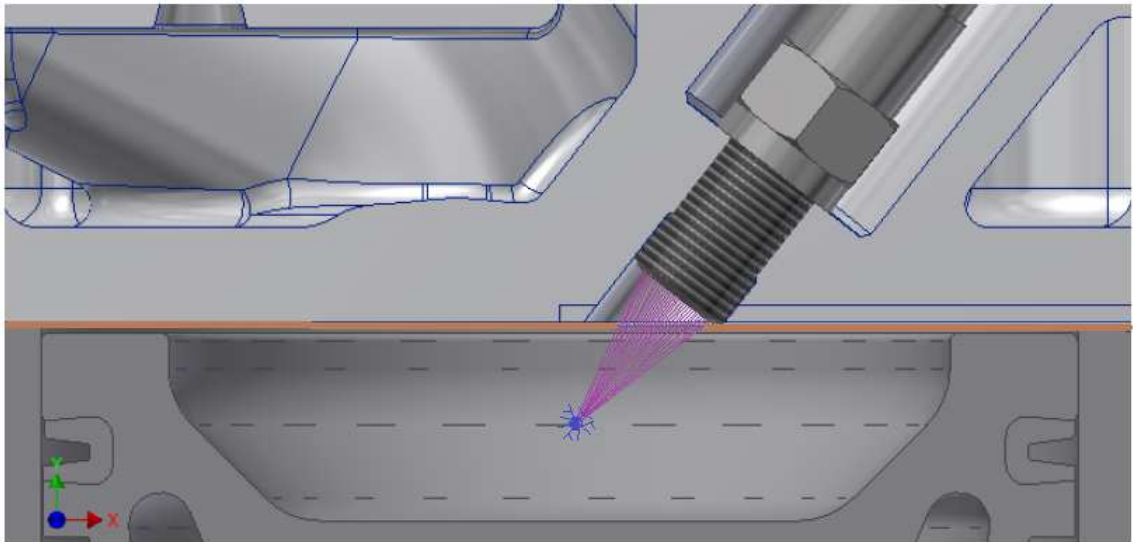


Obr.46: Porovnání modelů hlav pro motor TEDOM (pro dva válce)

a) – laserový modul, b) – zapalovací svíčka



Obr.47: Místo zapálení směsi paliva od zapalovací svíčky



Obr.48: Místo zapálení směsi paliva od laserového modulu

Jistým dalším řešením, které zde není popsáno, je generování laseru v jednom zdroji a jeho následný přenos k zapalovacím modulům (neobsahují laser), taktéž pomocí optických kabelů. Ovšem nevýhodou tohoto řešení je vyšší opotřebení optických kabelů vlivem vysoké intenzitě přenášené energie. Jeden zdroj laseru se často používá v experimentální sféře, ke zkoumání laserového zapalování, zatímco laserové zapalovací moduly jsou mnohem praktičtější pro běžné použití.

10. Závěr

Zapalovací systémy u zážehových spalovacích motorů se postupem času vyvíjely stejně rychle jako jejich ostatní příslušenství. Cílem vývoje zapalování bylo zvyšování výkonu motoru a zlepšení využití energie obsažené v palivu. V 60. letech 20. století přibyly k nárokům na spalovací motory, a tedy i na zapalování požadavky na snižování obsahu škodlivin ve výfukových plynech.

Nedostatky bateriového kontaktního a magnetového zapalování s pohyblivými mechanickými součástmi vyřešilo až plně elektronické zapalování, které se dnes používá téměř u všech vozidlových motorů. Starší zapalovací systémy bývají použity u některých neautomobilových motorů. Praktického uplatnění se nedočkal piezoelektrické zapalování vyznačující se nízkou spolehlivostí.

Všechny uvedené zapalovací systémy používaly k zážehu palivové směsi zapalovací svíčky, které jsou v provozu poměrně spolehlivé a mají nízkou pořizovací cenu. Jejich nevýhodou je konstrukčními možnostmi omezené umístění elektrod jiskřiště, tj. místo zážehu palivové směsi.

Koncem 20. století se začaly vyvíjet zapalovací systémy, které nemají zapalovací svíčku s omezenými možnostmi místa zážehu. Jedná se o zapalování vysokofrekvenční a o zapalování laserové. U vysokofrekvenčního zapalování dochází k zapálení palivové směsi uvnitř spalovacího prostoru vysokoenergetickým elektrostatickým polem tzv. korónovým výbojem. Trsovitý výboj vzniká v nehomogenním elektrickém poli okolo hran s vysokým potenciálem. Vysokofrekvenční i laserové zapalování umožňuje zážeh směsi s dostatečnou energií i v případě vysoké frekvence zapalovacích impulzů, je však stále pouze ve stadiu vývoje.

Laserové zapalování používá k zážehu laserový paprsek. Systém je schopen zapálit palivovou směs nejen v určitém místě spalovacího prostoru, ale i na několika místech současně, čas iniciace zážehu je kratší než v případě zapalovací svíčky.

Zmíněné vlastnosti vedou v porovnání se zapalováním svíčkou k snížení výfukových emisí CO, a HC i ke snížení spotřeby paliva. Nevýhody systému spočívají především v jeho složitosti a větších rozměrech a vysoké pořizovací ceně. Velikost mikrolaserového zapalovacího modulu je srovnatelná s velikostí běžné zapalovací svíčky.

Publikované výsledky experimentů porovnávajících zapalování elektrickou jiskrou a laserovým paprskem, při kterých bylo ohnisko laserového paprsku zaostřeno

do stejného místa, kde dochází u zapalování se svíčkou k přeskoku jiskry, ukazují, že u laserového zapalování, došlo k rychlejšímu zapálení palivové směsi, variabilita průběhu spalování byla nižší, mírně se snížila měrná spotřeba paliva, emise HC a CO mírně klesly a emise NO_x se nesnížily, laserové zapalování je schopno zapálit směs s vyšším přebytkem vzduchu než zapalovací svíčka. Na rozdíl od zapalování indukčních a kapacitních umožňuje laserové iniciovat zážeh palivové směsi s dostatečnou energií nezávisle na frekvenci zážehů. Díky uvedeným vlastnostem by mohlo laserové zapalování nalézt uplatnění především u průmyslových plynových motorů.

Za významný nedostatek laserového zapalování považují případné znečištění okénka, které odděluje samotný laserový systém od spalovacího prostoru. V literatuře je nastíněno, že safírové okénko má samočisticí vlastnosti čemuž se dá jen obtížně věřit.

Pro případné ověření vhodnosti použití laserového zapalování u průmyslových motorů TEDOM, je v diplomové práci navržen způsob jeho instalace na motor TG 210G5VTW 86 vč. úpravy hlavy válců a spalovacího prostoru v pístu. Je třeba si uvědomit, že dané řešení vychází z údajů v odborné literatuře a použité součásti nejsou zatím běžně dostupné.

Literatura

- [1] **BERU.** *Vše o zapalovacích svíčkách.* místo neznámé : Federal-Mogul GmbH.
- [2] **Brisco.** *Zapalovací svíčky.* místo neznámé : Brisco a.s.
- [3] **LAURIN, Josef.** *Elektrické zapalování.* Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2016.
- [4] **PEKÁREK, Stanislav.** Technologie oprav 1. [Online] Střední škola technická a zemědělská, 25. Únor 2015. <https://publi.cz/books/160/06.html>.978-80-88058-23-6.
- [5] **RIXECKER, Georg.** High-frequency Ignition System. *BorgWarner.* 2013.
- [6] **VOKÁČ, Luděk.** Auto.idnes. [Online] 14. Červenec 2001.
http://auto.idnes.cz/laserove-zapalovani-by-mohlo-po-110-letech-nahradit-tradicni-svicky-1cb-/automoto.aspx?c=A110513_175527_automoto_vok.
- [7] Wikiskripta. [Online] 2016. <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Laser>.
- [8] **KOŘÁN, Pavel.** Lasery a optika. [Online] 19. Únor 2013. <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>.
- [9] Wikipedia. [Online] 2016. <https://cs.wikipedia.org/wiki/Maser>.
- [10] ČVUT Fakulta strojní. [Online]
http://fyzika.fs.cvut.cz/subjects/fzmt/lectures/FZMT_10.pdf.
- [11] **ROWE, Duncan.** *Lasers for engine ignition.* 2008.
- [12] **Masaki Tsunekane, a kolektiv.** *Advances in Solid State Lasers Development and Applications.* místo neznámé : InTech, 2010. ISBN 978-953-7619-80-0.
- [13] **SRIVASTAVA Dhananjay Kumar, AGARWAL Avinash Kumar.** *Comparative experimental evaluation of performance.* Kanpur : Elsevier, 2014.
- [14] Zigwheels. [Online] 29. Zář 2011. <http://www.zigwheels.com/news-features/auto-insight/advanced-corona-ignition-system-acis-by-federalmogul/9801/> .
- [15] *Denso.* [Online] <http://www.controlin.nl/producten/product/bougies/denso-industriele-bougie-motortech-4.html>.
- [16] *Sestsettrojka.* [Online] 20. Květen 2004.
<http://sestsettrojka.euweb.cz/zapalovani.htm>.
- [17] *Mechatronika.* [Online] <http://mechatronika.wz.cz/index.php?z=zap>.
- [18] **Špička, Jiří.** *Coptel.* [Online]
<http://coptel.coptkm.cz/index.php?action=2&doc=42653&docGroup=-1&cmd=0&instance=4> .
- [19] *Magneton.* [Online] <http://www.magneton.cz/24836-historie>.

- [20] **Gruber, Josef.** [Online] 2008.
http://www.spstr.pilsedu.cz/osobnistranky/josef_gruber/clanky/lenoir.pdf.
- [21] **BLECHA, Jiří.** *JB-elektronik.* [Online] 11. Srpen 2011. http://www.jb-elektronik.cz/diagnostika-druhy_zapalovani.php.
- [22] **PAVLIS, Svatopluk.** *Sossoukyjov.* [Online] 1987.
http://www.sossoukyjov.cz/data/File/VY_32_INOVACE_6b03.pdf.
- [23] **PUHL, Martin.** *Corona and Laser Ignition in Internal.* Vídeň : Technische Universität Wien, 2007.
- [24] **ŠTEFEK, Petr.** *Auto Forum.* [Online] 2. Červen 2011.
<http://www.autoforum.cz/bleskovky/zapalovaci-svicky-by-mohl-nahradit-laser/>.
- [25] **VOZŇÁK, Jiří.** *Studentka.* [Online] 14. Duben 2014.
http://studentka.sms.cz/index.php?P_id_kategorie=7630&P_soubor=%2Fstudent%2Findex.php%3Fakce%3Dprehled%26ptyp%3D%26cat%3D85%26idp%3D%26detail%3D1%26id%3D3787%26view%3D1%26url_back%3D.
- [26] **Marián, ŠUMAN.** *Tatra T 603 a T 2-603.* Brno : Computer Press, 2009. ISBN 978-80-251-1941-9.
- [27] **Zdeněk, KRAJČOVIČ.** *Laserové paprsky „převálčují“ zapalovací svíčky.* *Světlo.* 2013.

Seznam obrázků a tabulek

Obrázky

Obr.1:	Řez zapalovací svíčkou a její popis	12
Obr.2:	Řez zapalovací svíčkou s jejím popisem [1]	13
Obr.3:	Elektrodová vzdálenost [1]	14
Obr.4:	Přeskok jiskry [1]	15
Obr.5:	Vliv teploty na přeskokovém napětí [2].....	18
Obr.6:	Vliv složení směsi na přeskokovém napětí [2]	18
Obr.7:	Vliv vlhkosti na přeskokovém napětí [2].....	19
Obr.8:	Schéma bateriové zapalování [2]	19
Obr.9:	Průběh teplot zapalovací svíčky [2]	22
Obr.10:	Teplotní meze samočisticího procesu zapalovací svíčky [1].....	23
Obr.11:	Dráha odvodu tepla zapalovací svíčkou [1]	23
Obr.12:	Zapalovací schéma	25
Obr.13:	Schéma magnetového kontaktního zapalování	26
Obr.14:	Schéma kontaktního magnetu s vyznačením odtrhu α	26
Obr.15:	Bezkontaktní kondenzátorové (tyristorové) magnetové zapalování s elektronickým snímačem	28
Obr.16:	Bezkontaktní kondenzátorové (tyristorové) magnetové zapalování pro jednoválcový motor	29
Obr.17:	Schéma klasického bateriového zapalování: [3]	31
Obr.18:	Zapalovací cívka [4]	32
Obr.19:	Rozdělovač [4].....	32
Obr.20:	Schéma činnosti přerušovače	34
Obr.21:	Schéma snímačů a) – indukčního, b) Hallova snímače	36
Obr.22:	Schéma piezoelektrického zapalování.....	38
Obr.23:	Voltampérová charakteristika elektrického výboje.....	39

Obr.24:	Dva prototypy HF regulátoru vysokofrekvenčního zapalování, typu A a B [5]	40
Obr.25:	Schéma vysokofrekvenčního zapalování pro šestiválcový motor.....	41
Obr.26:	Různé vysokofrekvenční zapalovací moduly s korónovým výbojem.....	41
Obr.27:	Srovnání hodnoty COMIMEP v závislosti na míře EGR.....	42
Obr.28:	Možnosti zapálení směsi ve spalovacím prostoru [6].....	44
Obr.29:	Schéma principu laseru [8].....	46
Obr.30:	Část vodíkového maseru [9].....	48
Obr.31:	Schéma Nd:YAG/Cr laseru s Q-spínáním	52
Obr.32:	Porovnání mikrolaserového modulu (dole) s klasickou zapalovací svíčkou (nahore) [13].....	52
Obr.33:	Schlierenovy fotografie zachycující počáteční fázi iniciaci zapálení stechiometrické směsi paliva.....	53
Obr.34:	Experimentální uspořádání pro laserový zapalovací systém: [13].....	57
Obr.35:	Srovnání tlaku ve válci a rychlosti uvolňování tepla pro laserové zapalování a zapalovací svíčku v závislosti na pootočení klikového hřídele, s předstihem zážehu	25
Obr.36:	Srovnání podílů shořelého paliva PSP – 5, PSP – 50, PSP – 90 pro laserové zapalování a zapalovací svíčku.....	62
Obr.37:	Změna maximálního tlaku ve válci s měnící se λ a předstihem zážehu [15]	64
Obr.38:	Změna COVIMEP s měnící se λ a předstihem zážehu [15].....	64
Obr.39:	Změna COVIMEP pro různé energie laserového pulzu [15]	64
Obr.40:	Měrná spotřeba paliva a výkonu v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu	65
Obr.41:	Emise NO _x a HC v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ pro tři předstihy zážehu	67
Obr.42:	Emise CO v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ pro tři předstihy zážehu.....	68
Obr.43:	a) - zapalovací svíčka Denso GK3-5 [16], b) - 3D model zapalovací svíčky Denso GK3-5, c) - 3D model laserového modulu Denso.....	70

Obr.44:	Model hlavy motoru TEDOM (pro dva válce) s laserovým zapalováním.....	71
Obr.45:	Čerpací LD s šesticí vývodů pro optické kabely k šestiválcovému motoru TEDOM.....	71
Obr.46:	Porovnání modelů hlav pro motor TEDOM (pro dva válce).....	72
Obr.47:	Místo zapálení směsi paliva od zapalovací svíčky	72
Obr.48:	Místo zapálení směsi paliva od laserového modulu	73

Tabulky

Tab.1:	Srovnání zapalovací schopnosti laseru a zapalovací svíčky s různými směšovacími poměry a s různým počtem pulzů laseru. [14].....	53
Tab.2:	Parametry plynového motoru TEDOM.....	68

Seznam použitých zkratek

Zkratky

°KH	natočení klikového hřídele
ACIS	<i>Advanced Corona Ignition System</i> vysokofrekvenční zapalování)
AR	antireflexní povlak
C	kondenzátor
CAN	C ontroller A rea N etwork (datová sběrnice)
CDI	C apacitive D ischarge I gnitor (magnetové bezkontaktní zapalování)
CNG	C ompressed N atural G as (stlačený zemní plyn)
D	dioda
DC-CDI	D irect C urrent - C apacitive D ischarge I gnitor (magnetové bezkontaktní zapalování s akumulátorovým napájením)
EGR	E xhaust G as R ecirculation (recirkulace spalin)
ŘJ	Elektrická Řídící Jednotka
ES	Elektromagnetický Snímač
FEL	F ree E lectron L aser (lasery s volnými elektrony)
HF	vysokofrekvenční regulátor
HR	vysoko odrazová vrstva
HT	vysoko propustná povlak
L	vinutí
LD	L aserová D ioda
LZ	laserové zapalování
MPI	M ulti P oint I njection (vícebodové vstřikování)
NA	numerická aparatura
PR	povlak s částečnou odrazivostí
PSP	podíl shořelého paliva
QCW	kvazikontinuální vlnění
TCI	T ransistor C ontrolled I gnition (tranzistorové zapalování)
TY	tyristor
YAG	Y ttrium A luminium G arnet (yttrito hlinitý granát)
ZC	zapalovací cívka
ZS	zapalovací svíčka

MBM

maximální brzdící moment

Jednotky

Značka	Jednotky	Název
C	[μF]	celková kapacita zapalovacího systému přepočtená na primár
C ₁	[μF]	kapacita primárního kondenzátoru
C ₂	[μF]	rozptylová kapacita sekundárního obvodu
COV _{IMEP}	[%]	směrodatná odchylka středního indikovaného tlaku
e	[-]	Eulerovo číslo
e _v	[mm]	elektroodová vzdálenost
i	[A]	primární proud
i	[A]	primární proud
I ₀	[A]	klidový proud
K	[-]	koeficient vazby mezi závitů
L ₁	[H]	indukčnost primárního vnutí indukční cívky
L ₁	[H]	indukčnost primárního vnutí indukční cívky
m _{pe}	[g/kWh]	měrná spotřeba
M _t	[N·m]	točivý moment
n	[min ⁻¹]	otáčky
P	[kW]	výkon
p	[Pa]	tlak plynu
R	[Ω]	celkový zatěžovací odpor zapalovacího systému přepočtený na primár
R ₁	[Ω]	ohmický odpor primárního obvodu
R _ξ	[Ω]	svodový odpor sekundárního obvodu u svíčky
R _z	[Ω]	ztrátový odpor, jehož hodnotu
t	[°C]	teplota
t	[s]	čas měřený od sepnutí kontaktů
U _{2max}	[V]	maximální výchylka napětí
U _j	[V]	jmenovité přeskokové napětí
z ₁	[-]	počet primárních závitů
z ₂	[-]	počet sekundárních závitů

α	[°]	odtrh
λ	[-]	součinitel přebytku vzduchu
σ_{IMEP}	[%]	směrodatná odchylka středního indikovaného tlaku
IMEP	[%]	průměrná odchylka středního indikovaného tlaku

Přílohy

- | | |
|-------------------------|-------------|
| [1] KVM – DP – 708 – 02 | Píst |
| [2] KVM – DP – 708 – 02 | Hlava válců |
| [3] CD nosič | |