



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Zapalovací systémy zážehových spalovacích motorů

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Martin Opočenský**
Vedoucí práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Martin Opočenský**
Supervisor: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin Opočenský**
Osobní číslo: **S13000145**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Zapalovací systémy zážehových spalovacích motorů**
Zadávací katedra: **Katedra vozidel a motorů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Na základě literární rešerše shrňte a stručně charakterizujte způsoby používané k zapálení palivové směsi v zážehových motorech. Uveďte provozní parametry zapalovacích systémů.
2. Proveďte kritické hodnocení jednotlivých zapalovacích systémů.
3. Odhadněte a popište trendy vývoje moderních zapalovacích systémů.



Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: cca 40 str.

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

[1] Robert Bosch GmbH: Autoelektrik Autoelektronik am Ottomotor. Berlin: Springer-Verlag, 2014.

[2] Odborná a firemní literatura zabývající se elektrickým zapalováním směsí v zážehových motorech dostupná na www.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Josef Laurin, CSc.
Katedra vozidel a motorů

Datum zadání bakalářské práce: 15. listopadu 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 15. února 2017

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 bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou 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.

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

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

Datum:

Podpis:

Poděkování

Především bych rád poděkoval Doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. z katedry vozidel a motorů na Technické univerzitě v Liberci jako vedoucímu bakalářské práce, který mi dával věcné rady při řešení problémů týkajících se mého zadání.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří mi svou pomocí, podporou, názorem či radou přispěli k vytvoření této práce. Nemalé díky také patří mé rodině, která mě podporovala, jak v průběhu celého studia, ale také při tvorbě této práce.

V Liberci dne:

Martin Opočenský

Anotace

Bakalářská práce je zaměřena na kompletní shrnutí a hodnocení doposud používaných zapalovacích systémů zážehových motorů od magnetového, až po plně elektronické zapalování. Dále se bakalářská práce zaměřuje na inovace zapalovacích systémů a také na zapalovací systémy, které by mohly nahradit dnes používané zapalování v zážehových vozidlových a stabilních motorech. Budoucnost v zapalování představují systémy na principu koronového výboje a laseru.

Klíčová slova:

magnetové zapalování, bateriové zapalování, tranzistorové zapalování, piezoelektronické zapalování, elektronické zapalování, kondenzátorové zapalování, plně elektronické zapalování, koronový výboj, laserové zapalování

Annotation

The aim of this Bachelor thesis is to provide a complete summary and evaluation of the ignition systems of spark ignition engines from magnetic ones to fully electronic ones. Further research of this Bachelor thesis deals with innovations of ignition systems as such and those which could replace ignition in spark ignition engines used nowadays. The future of ignition systems concerns the principle of the brush discharge and laser.

Key words:

magnetic ignition, battery ignition, transistor ignition, piezoelectronic ignition, electronic ignition, condenser ignition, fully electronic ignition, corone discharge, laser ignition

Obsah bakalářské práce

Seznam symbolů a zkratk.....	10
1. Úvod.....	12
2. Historie zapalování.....	13
3. 3.1 Základní princip zapalování zážehových motorů.....	14
3.2. Teorie zapalovacích svíček.....	19
4. Charakterizování a uvedení parametrů zapalovacích systémů.....	24
4.1 Magnetové zapalování.....	24
4.1.1 Princip činnosti.....	24
4.1.2 Hodnocení systému.....	28
4.2 Bateriové (klasické) zapalování.....	28
4.2.1 Princip činnosti.....	28
4.2.2 Hodnocení systému.....	40
4.3 Tranzistorové (polovodičové) zapalování.....	41
4.3.1 Princip činnosti.....	41
4.3.2 Hodnocení systému.....	47
4.4 Piezoelektrické zapalování.....	48
4.4.1 Princip činnosti.....	48
4.4.2 Hodnocení systému.....	49
4.5 Elektronické zapalování.....	49
4.5.1 Princip činnosti.....	49
4.5.2 Hodnocení systému.....	55
4.6 kondenzátorové zapalování.....	56
4.6.1 Princip činnosti.....	56
4.6.2 Hodnocení systému.....	58
4.7 Plně elektronické zapalování.....	59
4.7.1 Princip činnosti.....	59
4.7.2 Hodnocení systému.....	65
5. Porovnání zapalovacích systémů dle parametrů.....	66
5.1 Porovnání nejvyššího napětí výboje v závislosti na frekvenci zážehu....	66
5.2 Produkce plynu No_x	67..

6.	Odhad a popis trendů vývoje moderních zapalovacích systémů.....	68
6.1	Koronový výboj.....	68
6.2	Moderní svíčky Beru.....	71
6.3	Laserové zapalování.....	77
7.	Závěr.....	84
8.	Použitá literatura.....	85
	Seznam obrázků.....	87
	Seznam tabulek.....	89

Seznam symbolů a jednotek

B	magnetická indukce	[T]
C	elektrická kapacita	[F]
d	vzdálenost	[m]
E	intenzita elektrického pole	[V·m ⁻¹]
E	energie	[J]
F	síla	[N]
f	frekvence	[Hz]
H	magnetické pole	[A·m ⁻¹]
h	Planckova konstanta	[J·s]
h _e	zesilovací součinitel tranzistoru	[-]
I	elektrický proud	[A]
j	proudová hustota	[A·m ⁻²]
L	vlastní indukčnost	[H]
n	frekvence otáčení	[min ⁻¹]
M	intenzita vyzařování	[W·cm ²]
M _k	kroutící moment	[N·m]
P	výkon	[W]
p	tlak	[Pa]
Q	elektrický náboj	[C]
R	odpor	[Ω]
S	plocha	[m ²]
T	perioda	[s]
t	čas	[s]
U	elektrické napětí	[V]
u	elektrické napětí	[V]
V	objem	[m ³]
v	rychlost	[m·s ⁻¹]
t	teplota	[°C]
-	nárůst napětí	[V·s ⁻¹]
Φ	magnetický tok	[Wb]
λ	stechiometrický poměr	[-]

ω	úhlová frekvence	$[\text{s}^{-1}]$
τ	časová konstanta	$[\text{s}]$

1. Úvod

V této bakalářské práci bych se rád zaměřil na zapalování zážehových motorů. V dnešní době se tyto motory používají nejvíce v motorových vozidlech a strojích poháněných benzínovým motorem. Zapalovací systémy indukují vysoké napětí, které vyvolá výboj mezi elektrodami zapalovací svíčky. V historii se začínalo zapalováním žárovou trubicí. Poté v roce 1896 byla vyvinuta zapalovací svíčka a tak vzniká indukční zapalování. Dnes je asi nejstarší používané zapalování magnetové. Postupem času se vyvíjejí další zapalovací systémy, jsou odstraňovány mechanické části zapalování a do popředí se dostává elektronika. V této práci bych rád přiblížil typy zapalovacích systémů, jejich části a princip činnosti. Dále si položíme otázky: Jaké mají tyto systémy výhody a nevýhody? Jak jsou spolehlivé? Nejdříve bychom si asi měli říci něco o historii zapalování, základním principu přeskoku jiskry v plynu a jak funguje zapalovací svíčka.

Dále bych chtěl zmínit budoucnost zapalování, inovace na zapalovacích svíčkách a částech zapalovacího systému. Do budoucnosti patří nejspíše koronové zapalování a laserové zapalování. Budou mít tyto systémy reálné využití? Budou spolehlivé s dlouhou životností? Mohly by systémy na principu koronového výboje a laseru dojít až do fáze sériové výroby? Jaká jsou úskalí ve vývoji? V dnešní době i v budoucnosti jsou kladeny na zapalovací systémy stále přísnější nároky. Hodnotí se úspora paliva, spolehlivost a emise motorů.

2. Historie zapalování zážehových motorů a zrození automobilu

Dle [1], byl jedním z prvních představitelů zapalování německý obchodník Nikolas August Otto, který se svým kolegou Eduardem Langenem získal v letech 1864-1866 patent na plynový spalovací motor. V roce 1867 představili výbušný atmosferický motor, který byl zdokonalený motor Lenoirův. Dvoudobý pracovní cyklus motoru byl primitivní, po zapálení směsi se píst pohyboval tlakem plynu a setrvačností tak, že ve válci nastal podtlak. Motor pracoval bez komprese a jeho otáčky byly jen 60 min^{-1} s nízkým výkonem.

Vývoj automobilů, spalovacích motorů a jejich příslušenství probíhal od 19. století v rychlém tempu - viz tabulka 1.

Rok	Automobil	Spalovací motor	Příslušenství
1859		Lenoir, patent dvoudobý motor	
1860		Lenoir, plynový dvoudobý motor	
1863	Lenoir, tříkolové vozidlo		
1865	Marcus, pokusný vozík		Marcus, odpař. karburátor
1866			Siemens, dynamo
1877	Marcus, vozidlo	Otto, patent čtyřdobý motor	
1879		Benz, dvoudobý motor	
1885		Daimler, čtyřdobý motor	
1886	Benz a Daimler		Bosch, elektr. zapalování
1887			Dunlop, pneumatika
1889		Daimler, dvouválcový motor	
1890		Maybach, čtyřválcový motor	
1893	DeDion & Bouton, vůz s kloubovou hnací hřídelí		Daimler, kuličková lož.
1894			Maybach, karburátor
1897		DeDion & Bouton, rychloběžný motor $0,5 \text{ CV}/3000 \text{ min}^{-1}$ Diesel, vznětový motor	
1899	Horch, německý vůz s kloubovou hnací hřídelí		
1901	Benz, klasická koncepce		
1902			Bosch, zapalovací svíčka
1909		Benz, patent – vznětový motor	

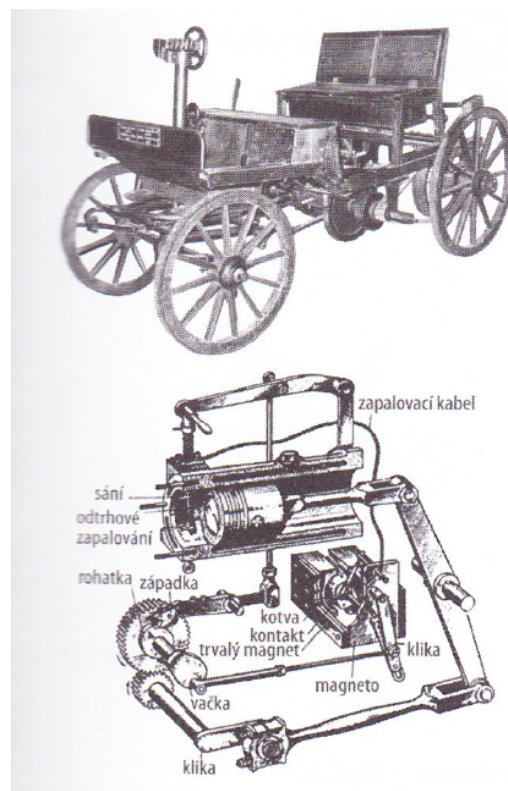
Tabulka 1, historický vývoj [1]

V roce 1884 Otto zdokonalil elektrické zapalování, zavedl nízkonapěťové magneto a použil odpařovací karburátor. V roce 1889 Gottlieb Daimler postavil dvouválcový motor s válci do V a Carl Friedrich Michael Benz motor s protilehlými válci (boxer), který nazval „kontramotor“. Přestože se pístový spalovací motor využíval od sedmdesátých let 19. století k pohonu stabilních zařízení, ještě dalších deset let trvalo, než byl použit ve vozidlech. O prvenství při zkonstruování automobilu se vedou

spory, zda je rozhodující podání patentu, přiznání patentu, první úspěšné jízdy i první neúspěšné jízdy. Pro Francouze je tak prvním automobilem vůz Leonirův (1863), pro Němce Benzův a Daimlerův (viz obr. 1) (1886) a pro Rakušany Marcusův (viz obr. 2) (1875).



Obr.1 – Kočár s motorem Daimler [1]



Obr. 2 – Vůz Marcusův s benzínovým motorem [1]

První člověk, který přišel 16. 8. 1896 s patentem na zapalovací svíčku byl Nikola Tesla. Popisuje první systém, který využívá k zapálení paliva jiskru, vytvořenou pomocí vysokého napětí. Poté přišly další patenty od Fredericka Richard Simmse, Roberta Bosche a od Karla Benze. V historii bylo použito několik způsobů zapálení směsi, jako například zapalování žárovou trubicí. Dodnes asi nejstarším využívaným způsobem zapalování je vysokonapěťové magneto, potom zapalování bateriové. Tento systém je dodnes nejrozšířenější u většiny zážehových motorů. S postupem času se do zapalovacích systémů začala prosazovat řídicí elektronika, která vytlačovala mechanické zařízení. V dnešních systémech již není zapotřebí rozdělovače, přerušovače, regulace otáček, atd. Vše řídí řídicí jednotka z naměřených parametrů

motoru, aby zapalování bylo co nejlepší k provozním podmínkám chodu motoru a co nejlépe přizpůsobeno provozním podmínkám chodu motoru.

3. 1 Základní princip zapalování zážehových motorů

Dle [2], je řečeno, že v zážehových motorech dochází k zapálení paliva pomocí zapalovací svíčky. Do válce je nasávána směs vzduchu a paliva, kterou stlačuje píst k hlavě válce, kde se nachází zapalovací svíčka. Na zapalovací svíčku je přivedeno vysoké napětí 14 – 35 kV. Toto napětí způsobí, že ve svíčkovém jiskřišti přeskóčí jiskra právě v okamžiku, kdy je píst před horní úvratí a směs je jiskrovým výbojem zapálená. Tento výboj musí přijít vždy s předstihem před horní úvratí, aby celá směs dokonale prohořela a bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti motoru.

3.1.1 Vedení elektřiny v plynech

Za normálního (atmosferického) tlaku se chová plyn jako izolant. To však platí jen za určitých okolností. Vlivem řady příčin (různé záření, tepelný pohyb molekul při vysokých teplotách, elektrické pole) vznikají v plynech z původně neutrálních molekul ionty a volné elektrony. V plynu se část vzniklých iontů při setkání s ionty opačné polarity nebo elektrony spojuje a vytváří znovu neutrální molekuly (tzv. rekombinace). Pokud jsou příčiny ionizace konstantní, je počet nově vzniklých a rekombinovaných iontů stejný a vodivost plynu se tedy nemění

3.1.2 Elektrický výboj v plynech

Mechanismus vzniku elektrického výboje lze vysvětlit na příkladu dvou elektrod, na nichž je přivedeno napětí. V elektrickém poli mezi oběma elektrodami se kladné ionty pohybují k záporné elektrodě (katodě) a záporné ionty ke kladné elektrodě (anodě). Výsledný pohyb iontů je tvořen pohybem tepelným a pohybem způsobeným elektrickým polem. Zvyšuje-li se napětí na elektrodách, pak vlivem silnějšího elektrického pole zasahujícího i do větší vzdálenosti od elektrod, se dává do pohybu stále větší počet iontů z celkového množství, které jsou v plynu přítomny. Ty ionty, které se již pohybovaly, se pohybují stále rychleji, takže se zmenšuje možnost jejich rekombinace. To vše má za následek zvětšení množství volných nosičů elektrického náboje a tedy i proudu a to úměrně se zvyšováním napětí na elektrodách. V okamžiku, kdy byly uvedeny do pohybu všechny volné nosiče elektrického náboje, dosáhne proud

ustálené hodnoty řádově menší než $10^{-18} \text{ A.cm}^{-2}$. Je-li na elektrody přivedeno napětí, jehož velikost je větší nebo rovna přeskokovému (průraznému) napětí U_p , přeskóčí jiskra až za určitou dobu. Tato se nazývá zpoždění výboje a je nutná pro vytvoření lavinového proudu volných nosičů elektrického náboje. Je pochopitelné, že u zapalování, kde je na elektrody přiváděno napětí ve formě krátkých impulsů, je nutno s touto dobou počítat, i když je její absolutní hodnota velmi malá.

3.1.3 Výboj mezi elektrodami zapalovací svíčky

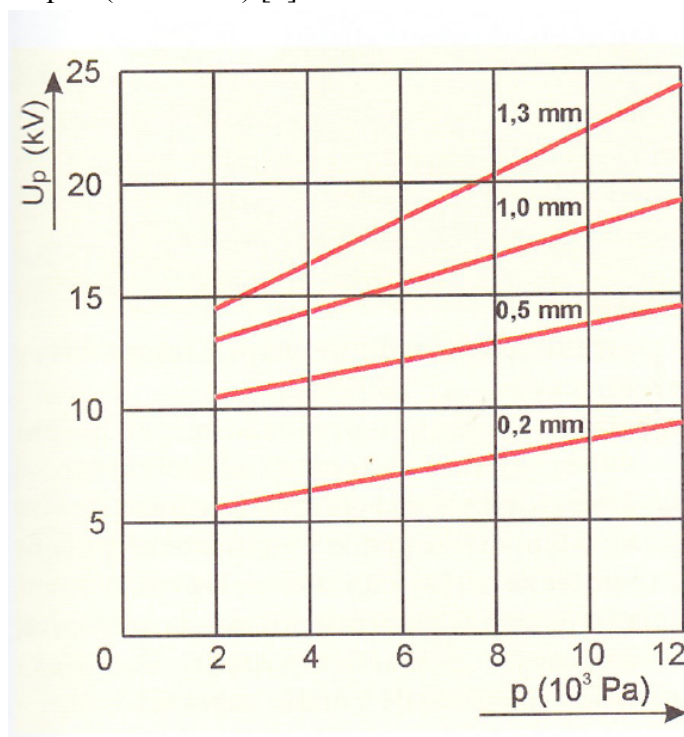
Výboj mezi elektrodami zapalovací svíčky je velmi složitý fyzikální pochod. Jako každý elektrický výboj závisí na vlastnostech zdroje a podmínkách v prostoru jiskřiště. Z hlediska provozních podmínek u zážehových motorů je nejdůležitější vliv tlaku plynu p , vzdálenosti elektrod d a rychlosti nárůstu přiloženého napětí na průrazné napětí U_p .

Závislost těchto dvou činitelů pro kulové nebo hrotové jiskřiště popisuje s dostatečnou přesností **Paschelův zákon** $U_p = f(p, d)$

p – tlak plynu (Pa)

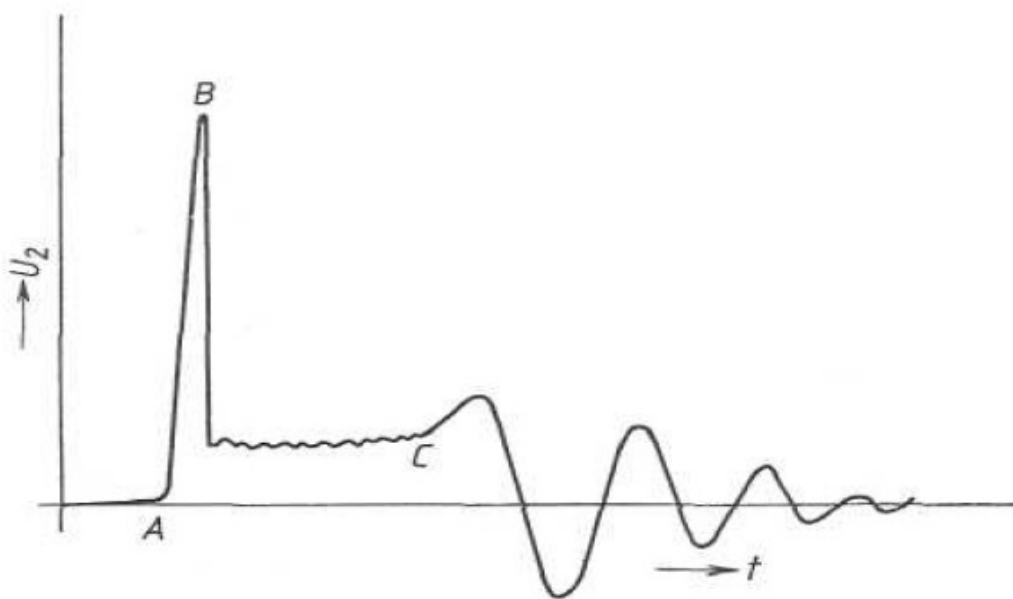
d – vzdálenost elektrod (mm)

Ze zákona plyne, že velikost přeskokového napětí při teplotě je funkcí (je závislá) na součinu $p \cdot d$. (viz obr. 3) [2]



Obr. 3 Závislost přeskokového napětí na tlaku a vzdálenosti elektrod [2]

Mezi elektrodami svíčky (hrotové jiskřiště) přivedením vnějšího napětí vzniká elektrické pole. V jiskřišti vznikne ionizované prostředí, které je schopno vést elektrický proud. V tomto elektrickém poli se kladné ionty pohybují směrem ke katodě (-), záporné ionty se přesouvají k anodě (+) a vzniká jiskrový výboj.[3] Ve [4], bylo řečeno: „Výboj závisí na tvaru, materiálu elektrod a teplotě jejich povrchu, na druhu plynu a jeho tlaku a především na napětí mezi elektrodami (vlastnosti zdroje)“.



Obr. 4 - Průběh napětí na elektrodách zapalovací svíčky [3]

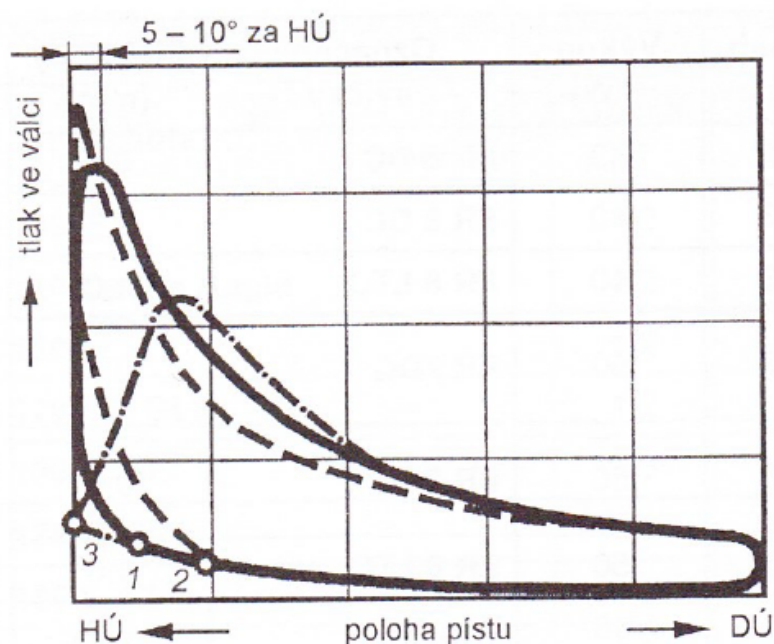
Na obr. 4 je typický průběh napětí na elektrodách zapalovací svíčky zážehového motoru. Po přerušení proudu v primárním obvodu zapalovací cívky stoupá sekundární napětí z bodu A do bodu B, kde nastává průraz. Na kontaktech zapalovací svíčky a v jiskřišti vzniká jiskrový výboj. Napětí velmi rychle poklesne a výboj trvá až do okamžiku C, kde po odčerpání větší části energie zhasíná. Napětí klesá v tlumených oscilacích až k nule, ale už bez trvajících výboje (dokmitávání). Experimentálně bylo zjištěno, že nejdůležitější pro zapálení směsi ve válci je první krátký průraz na začátku výboje (z bodu A do bodu B) a energie, která se jím vybije. Tento rozhodující výboj je způsoben vybitím kapacity zapalovací svíčky (svíčka vlastně představuje kondenzátor, protože má dvě elektrody oddělené dielektrikem), trvá řádově $10^{-7} - 10^{-8}$ s a nazývá se **kapacitní**.

3.1.4 Vztah mezi zapalováním a prací motoru

Elektrický výboj musí zapálit palivovou směs v pracovním prostoru spalovacího motoru, musí obecně splňovat tři požadavky:

- musí k němu dojít ve vhodný okamžik
- musí být schopen směs zapálit
- musí ji zapálit tak, aby byla co nejmenší prodleva mezi okamžikem výboje a začátkem hoření směsi

Okamžik zapálení směsi ve válci se zpravidla volí tak, aby plocha tlakového diagramu byla co největší. Předčasné nebo opožděné zapálení má za následek zmenšení výkonu a větší spotřebu paliva. Vliv seřízení ukazují tlakové diagramy, viz obr. 5.

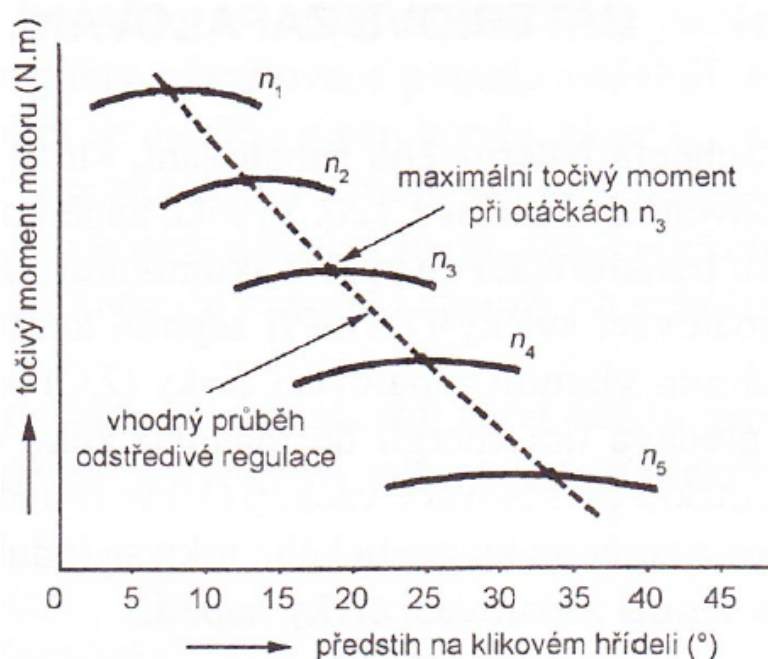


Obr. 5 Vliv předstihu na tlakový diagram motoru [4]

1 – okamžik správného předstihu, 2 – okamžik velkého předstihu 3 - okamžik pozdního zážehu

Při optimálním zapálení směsi (bod 1) dosahuje tlak a teplota maxima v úhlu 5 – 10° za horní úvratí na začátku expanzního zdvihu. Je-li směs zapálená předčasně (bod 2), vzroste předčasně i tlak před horní úvratí v kompresním zdvihu, takže působí proti pohybu pístu a celý děj probíhá se ztrátami. Při opožděném zapálení (bod 3) dohoří směs až pozdě v expanzním zdvihu. Celý děj probíhá při nižším tlaku a menší účinnosti a motor se více zahřívá. [2]

Poloha klikové hřídele před horní úvratí udává tzv. **předstih**. Zjišťuje se tak, že se měří výkony nebo momenty a tím i specifické spotřeby motoru při různých hodnotách předstihu, otáček a otevření škrticí klapky, viz obr. 6.



Obr. 6 Regulační křivka předstihu z momentových charakteristik motoru [4]

Zpravidla bývá předstih menší než 60° před horní úvratí klikového hřídele, nejčastěji bývá mezi 10° a 40° . Se vzrůstajícími otáčkami je třeba zvětšovat předstih, protože píst v době hoření směsi urazí delší dráhu. Plamen postupuje průměrnou rychlostí 30 m.s^{-1} , ale rychlost hoření není stálá. Závisí na složení směsi, rychlosti jejího víření ve válci a teplotě. Je skoro vždy v nějaké souvislosti s tlaky v sání. [2]

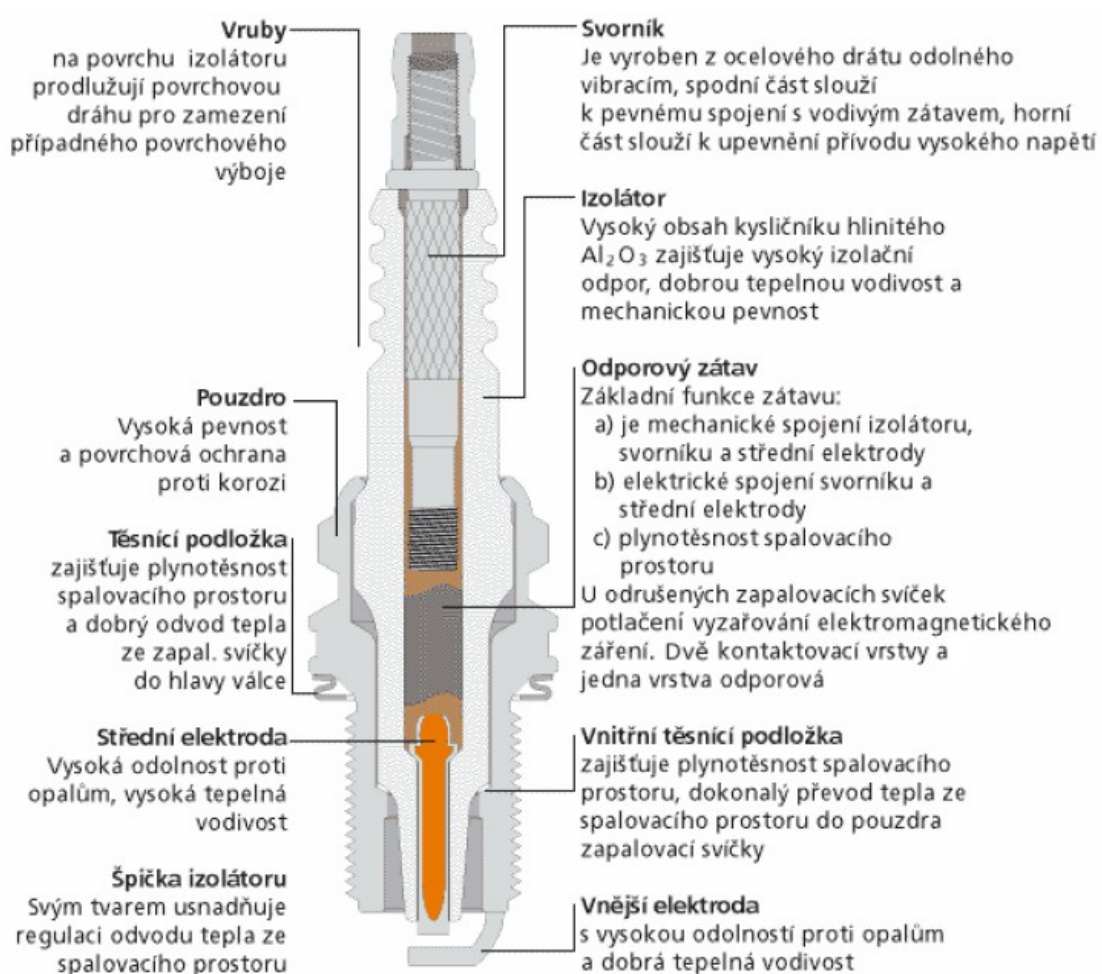
3.2 Teorie zapalovacích svíček

K zapálení směsi je nutno ve válci motoru vhodně umístit elektrody mezi nimiž přeskóčí jiskra. To umožňuje zapalovací svíčka zašroubovaná v hlavě válce. Vysokonapěťová zapalovací svíčka musí splňovat stále náročnější požadavky, neboť se zvyšují měrné výkony, rozšiřují pracovní rozsah motorů a zvětšují se nároky na dobu životnosti při menší údržbě. Svíčka pracuje ve velmi obtížných podmínkách. Při hoření směsi je ve válci teplota 2000°C až 2500°C a tlak až 6MPa (60 bar). Při sání je ve válci podtlak a teplota okolo 60°C a tyto stavy se velmi rychle střídají. Materiály svíčky musí přenášet velké teplotní spády, odolávat chemicky velmi agresivnímu prostředí. Izolátor

svíčky musí bez poškození a bez velkých energetických ztrát odolávat napětovým rázům až 25 kV, u elektronického zapalování až 30 kV i více.

3.2.1 Konstrukce svíčky

Hlavní konstrukční materiály pro svíčky jsou kovy a keramika. Tyto materiály mají velmi rozdílné vlastnosti, které se při konstrukci svíčky vhodně doplňují. Zapalovací svíčka (obr. 7) se skládá ze střední elektrody, keramického izolačního tělesa, z kovového pouzdra nesoucího elektrodu a šroubení, kterým se svíčka zašroubuje do hlavy válce tak, aby svým spodním koncem zasahovala do spalovacího prostoru. [2]



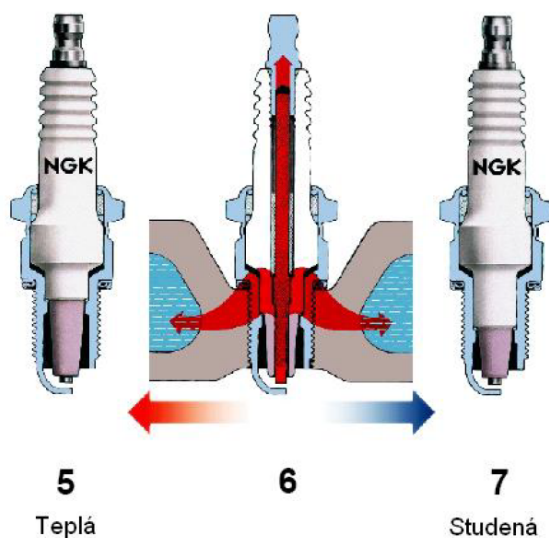
Obr. 7 - Řez zapalovací svíčkou [5]

Do koncovky ústí kabel vysokého napětí nebo přímo zapalovací modul. Zápalná směs se zapálí, přeskóčí-li jiskra mezi elektrodami. Pro velmi namáhavý provoz se na konce elektrod navářejí slitiny wolframu, platiny nebo iridia. Střední elektroda bývá

nejčastěji v izolátoru uchycena polovodivým křemíkovým zátavem, který zajišťuje těsnost spojení. Elektroda má o něco menší průměr než je otvor ve spodní části izolátoru. Toto provedení je nutné z hlediska různé tepelné roztažnosti kovů a keramiky.

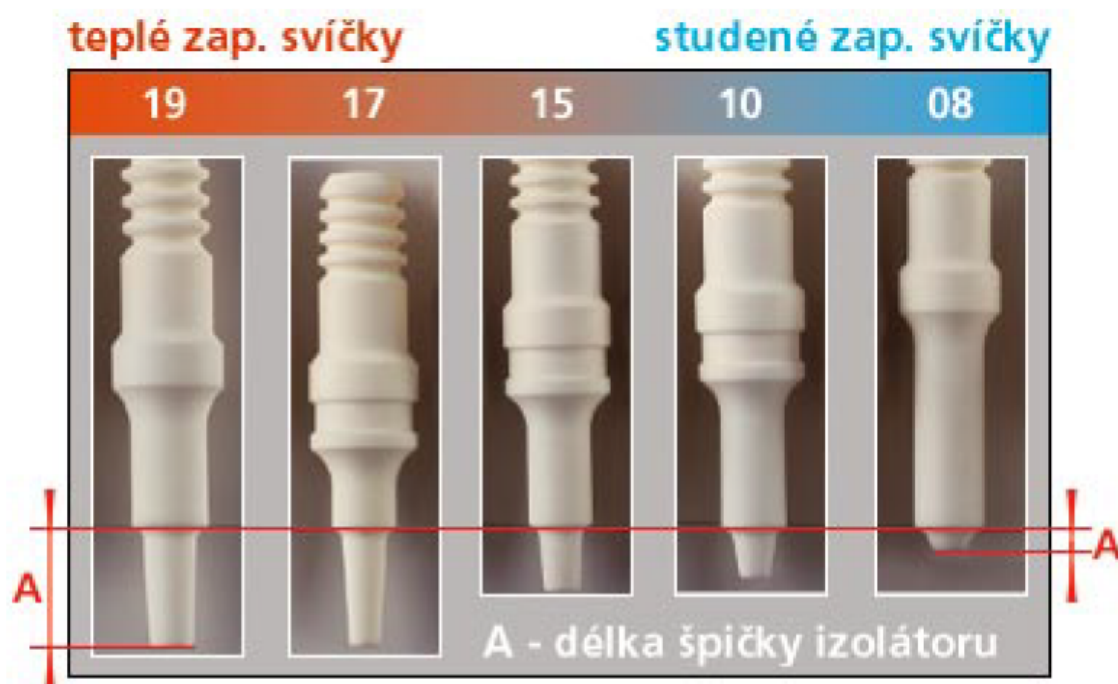
Podle nároků na materiál je nejdůležitější část svíčky izolátor. Nyní se používají převážně materiály, jejichž hlavní složkou je velmi čistý oxid hlinitý (Al_2O_3) doplněný malým množstvím dalších přísad. Materiály mají názvy Pyranit, Corundit, Rubinit apod. Pouzdro je ocelové a slouží k upevnění svíčky do hlavy válců. V horní části pouzdra je šestihran pro klíč, jehož pomocí se provádí montáž a demontáž svíčky. Ve spodní části je závit pro upevnění svíčky v hlavě válců. Na části izolátoru ve spalovacím motoru se mohou usazovat pohonné látky a zplodiny hoření, které je někdy přechodně velmi nedokonalé a z izolátoru se musí při provozu samočinně odstraňovat. Provozní teplota špičky izolátoru má být proto v rozmezí 500 – 800°C. Hranice 500°C je spodní mez tzv. *samočisticí teploty*, při níž shoří na izolátoru úsady, které by zvětšovaly elektrickou vodivost povrchu. Teplota 800°C je spodní mez teplot, při níž se již vznítí palivová směs, přijde-li do styku s teplým povrchem.

Schopnost svíčky snášet bez samozápalů určité tepelné zatížení se udává jako její **tepelná hodnota** (obr. 8 a 9). Svíčka s vyšší tepelnou hodnotou v běžném názvosloví označována jako studenější, je bezpečnější proti samozápalům, ale náchylnější k úsadám na izolátoru. Vyznačuje se tím, že přístup tepla je omezován a odvod zkvalitněn, špička izolátoru je krátká a zpravidla více zakrytá pouzdrům. Svíčka s nižší tepelnou hodnotou má naopak vystavenou plochu působením tepla větší a odvod tepla je ztížen. Špička izolátoru je delší a někdy vyčnívá až do spalovacího prostoru.



Obr. 8 Provedení svíček s různými tepelnými hodnotami [5]

V [5] bylo řečeno: *Čím je svíčka teplejší, s menší tepelnou hodnotou, tím je méně odolná proti samozápalům, ale méně citlivá na úsady.*



Obr. 9 - Provedení izolátoru pro různé tepelné hodnoty [5]

3.2.2 Speciální typy svíček

Svíčky pro sportovní motorová vozidla – motory pro sportovní vozidla vykazují vzhledem k vysokému výkonu značné tepelné zatížení. Svíčky pro tento druh provozu mají často stříbrné nebo platinové elektrody a velmi krátkou špičku izolátoru. Vzhledem k tomu je přenos tepla do svíčky velmi malý a odvod tepla velmi rychlý.

Svíčky s rezistorem – zařazením rezistorů do přívodu proudu ke střední elektrodě se omezuje šířením rušivých impulsů ze svíčky a tím se snižuje rušení. Rezistor může být vytvořen pomocí křemíkového zátavu. Požadované velikosti odporu zátavu se dosáhne použitím vhodných příměsí.

Zcela odstíněná svíčka – v případě maximálních nároků na odrušení je nezbytné celkové odstínění svíčky. Odstínění svíčky je docíleno kovovým pouzdem, do kterého je svíčka umístěna. Koncovka je uvnitř izolátoru. Odstíněný kabel svíčky je upevněn na kovovém stínícím pouzdru převlečenou maticí. Svíčka je vodotěsná. [2]

3.2.3 Značení svíček

Značení svíček se provádí značkou tvořenou **kombinací číslic a písmen** a je zcela závislé na výrobci. Navíc může i u téhož výrobce v relativně krátké době docházet ke změnám označení. Proto jsem vybral dva příklady značení u českých výrobců BRISK a BOSCH.

Označení svíček BRISK

např. **DR15YC-1**

D – rozměr pouzdra

R – s odrušovacím rezistorem (X – s rezistorem pro snížení opalování elektrod, - bez odrušovacího rezistoru)

15 – tepelná hodnota svíčky (08, 10, 12, 14 – studená, 15, 17, 19 – teplá svíčka)

Y – vysunutá špička izolátoru (- bez vysunutí, T – tři vnější elektrody, Z – dvě pomocné elektrody, X- jedna pomocná elektroda)

C- střední elektroda s měděným jádrem (- střední hodnota ze slitin niklu, S- stříbrná střední elektroda)

1- vzdálenost elektrod 1,00 mm a více (- vzdálenost elektrod 0,50 – 0,90)

Označení svíček BOSCH

např. **WR7DTCX**

W – rozměry pouzdra

R – provedení (odstíněná, s klouzavým výbojem, s odrušením, pro malé motory)

7 – tepelná hodnota svíček

D – délka závitu a uspořádání jiskřiště

T – uspořádání elektrod

C – materiál elektrod

X – provedení (předřadný odpor, vzdálenost elektrod, materiál boční elektrody)

4. Charakterizování a uvedení parametrů zapalovacích systémů

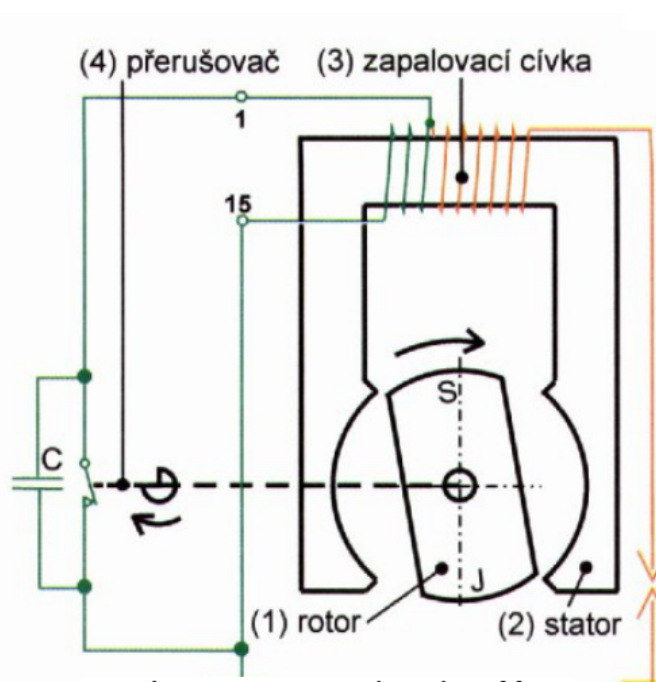
Asi nejvýznamnějším výrobcem zapalovacích systémů v minulosti i současné době je firma Bosch. Další je např. Siemens.

4.1 Magnetové zapalování

Je to v dnešní době asi již nejstarší používaný systém zapalování.

4.1.1 Princip činnosti magnetového zapalování

U magnetového zapalování se potřebný proud v primárním vinutí zapalovací cívky získává elektromagnetickou indukcí, která je získána ze zvláštního točivého stroje buzeného permanentními magnety, zvaného *magneto*. Schéma magneta je na obr. 10. Vysoké napětí se však nezískává pohybem vodičů v magnetickém poli, ale podobně jako u bateriového zapalování se využívá akumulovaná energie do magnetického pole cívky a jejího náhlého uvolnění přerušením primárního proudu. Magnetové zapalování se používá u malých motocyklů, lodních motorů, sekaček, motorových pil (zkrátka tam, kde není k dispozici akumulátor nebo akumulátor dostatečné kapacity).

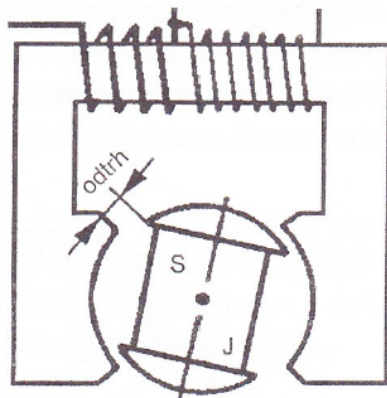


Obr. 10 Princip magnetového zapalování [2]

Magnetové zapalování se skládá z rotoru, který je tvořen permanentním magnetem (1) a statoru (2). Na statoru je navinutá zapalovací cívka (3), která má

spojeno primární vinutí s přerušovačem nakrátko. Na společném hřídeli s rotorem je vačka přerušovače (4) a v případě víceválcového motoru i rozdělovač. Kontakty přerušovače jsou přemostěny kondenzátorem C, který zamezuje opalování kontaktů při oddalování kontaktů přerušovače.

Otáčející se rotor vytváří magnetické pole, jehož indukční čáry protínají vinutí zapalovací cívky. Velikost magnetického toku se při otáčení rotoru mění velikost napětí pro vytvoření jiskry a i do směru magnetického toku. Napětí, které se indukuje v primárním vinutí zapalovací cívky způsobí, že cívkou přes sepnuté kontakty prochází proud, který vytváří magnetické pole statoru. V okamžiku, kdy je primární proud a tedy i magnetické pole maximální, přeruší přerušovač primární obvod. V důsledku rozpojení kontaktů dojde k poklesu primárního proudu a magnetické pole cívky klesne téměř na nulu (zůstane pouze magnetické pole rotoru). Tato změna způsobí indukci napětí na sekundárním vinutí cívky, které už je dostatečně vysoké na přeskok jiskry na zapalovací svíčke a tím i zažehnutí směsi v motoru. Vzdálenost elektrod na zapalovací svíčke pro magnetové zapalování se pohybuje mezi **0,35 – 0,5 mm**. Protože vačka, která kontakty rozpojuje je obvykle na jednom hřídeli s rotorem magneta, je nutné, aby k rozpojení kontaktů došlo po oddálení pólových nastavců, kdy má magnetické pole větší energii. Aby byla tato poloha snadno měřitelná používá se veličina zvaná **odtrh**, jejíž význam je patrný z obr. 11. Je to vlastně vzdálenost mezi jednou hranou pevnou a jednou otáčející se. Odtrh vyjádřený ve stupních bývá u magnetového zapalování obvykle 8 až 10° (dle stanovení výrobce). Při nastavení velkého odtrhu se napětí magneta sníží, protože se sníží velikost primárního proudu v okamžiku rozpojení kontaktů. Při nastavení malého odtrhu se napětí sníží ještě víc, protože primární proud stoupá na maximální hodnotu strměji než z ní potom klesá.



Obr. 11- Měření odtrhu [4]

Úhel předstihu zážehu lze u magnetového zapalování regulovat dvojím způsobem

- 1) ***Se současnou změnou odtrhu a tím i výkonu***- v tomto případě se využívá natočení vačky přerušovače vzhledem k rotoru. Tím se současně s úhlem předstihu zážehu mění i poloha rotoru v okamžiku přerušení primárního obvodu. Tato regulace je možná jen u magnetu s dostatečným přebytkem výkonu.
- 2) ***S konstantním odtrhem*** – u tohoto způsobu regulace je nutné natáčet celou soustavou magnetu prostřednictvím odstředivého regulátoru, který musí být podstatně zesílen, protože překonává velké setrvačné síly.

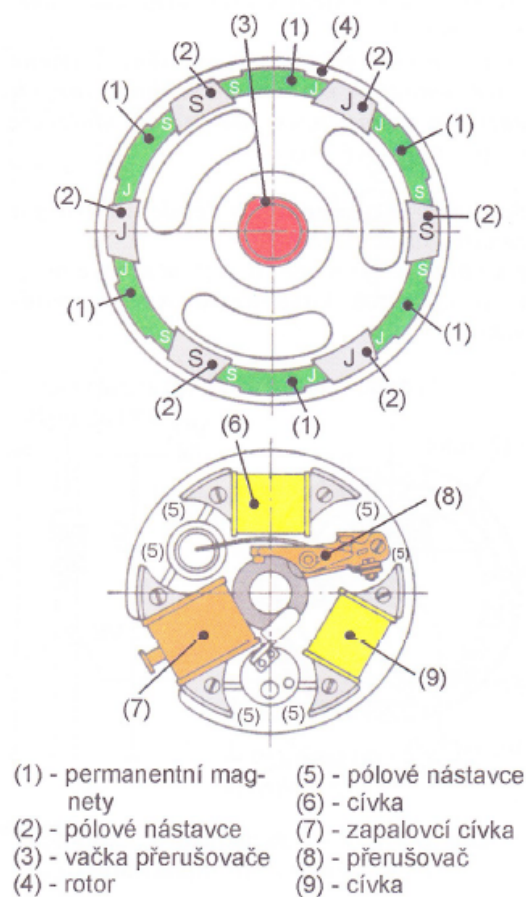
Druhy magnet - podle konstrukce

- 1) *S rotující cívkou a pevným permanentním magnetem* - tato konstrukce je složitá, poněvadž na rotoru je méně místa pro vinutí, izolaci a s přerušovačem se otáčí i kondenzátor. Z těchto důvodů se dnes tyto magnety nepoužívají.
- 2) *S rotujícím permanentním magnetem a stojící cívkou* - tento typ jsme si popsali. Nejpoužívanější uspořádání magnetového zapalování.
- 3) *S rotujícími magnetickými můstky a stojícími permanentními magnety i zapalovací cívkou* - tato konstrukce se používá v letectví pro víceválcové, hvězdicové motory.

Setrvačnickové magneto [2]

Viz obr. 12

„Setrvačnickové magneto kromě své základní funkce umožňuje ještě výrobu proudu pro napájení světel, spotřebičů, případně akumulátorů. Oběžný rotor magnetu je proveden jako setrvačnický (proto název setrvačnickové magneto). Setrvačnickové magneto na obr. 12. je určeno pro jednoválcový dvoudobý motor. Magneto se skládá z rotoru (4), který nese magnety (1) a pólové nástavce (2), které v tomto případě vytvářejí šest pólů. Náboj rotoru je opatřen vačkou přerušovače (3). Na statoru jsou tři cívky (6, 7 a 9) s jádry složenými z plechů. Na statoru je ještě umístěný přerušovač (8) ovládaný vačkou (3) a mazaný olejem, který je napuštěn do plsti. Cívka (7) je určena pro zapalování, proud indukovaný v cívkách (6 a 9) je možno použít k dobíjení akumulátoru a napájení světel, případně i dalších spotřebičů.“ [2]



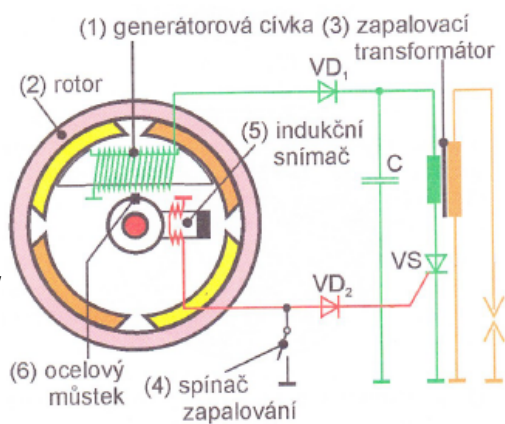
Obr. 12 Setrvačnickové magneto [2]

Toto uspořádání magnetového zapalování se hodně uplatňovalo u starších motocyklů Jawa.

Setrvačnickové magneto s kondenzátorovým zapalováním [2]

Viz obr. 13

„Rotor (2) je čtyřpólový a na jeho náboji je umístěn ocelový můstek (6), který ovládá indukční snímač (5) umístěný na statoru. Na statoru je generovaná cívka (1). Proud vyrobený cívkou nabíjí přes diodu VD_1 kondenzátor C a tyristor VS se otevírá napěťovými impulsy z indukčního snímače (5).“ [2]



Obr.13 Setrvačnickové magneto s kondenzátorovým zapalováním [2]

4.1.2 Hodnocení systému

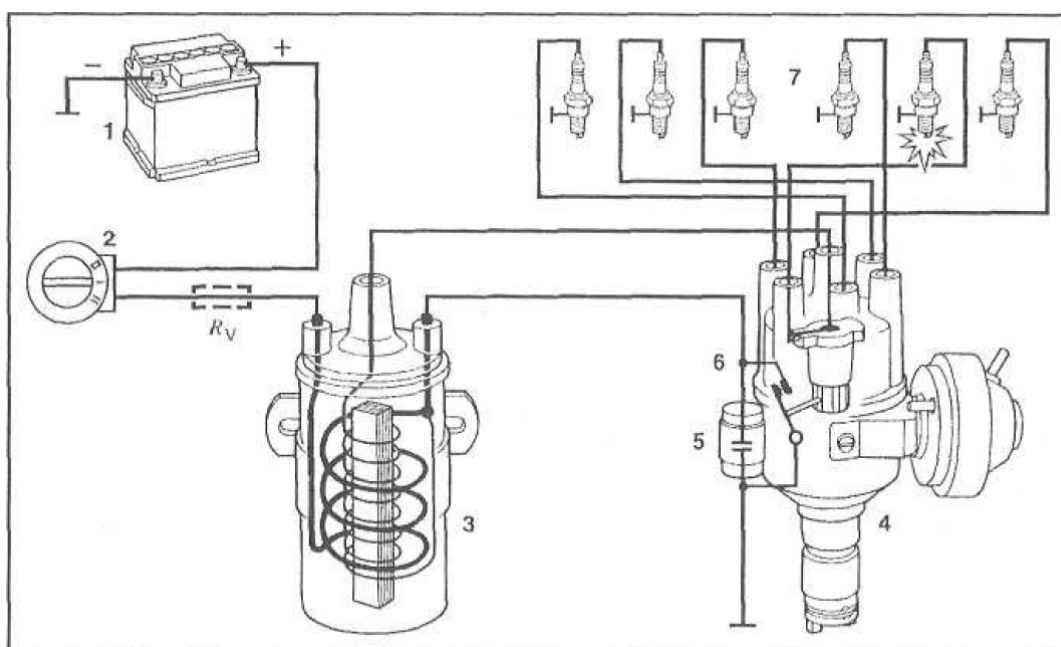
Tento systém zapalování se dnes vyskytuje pouze u sekaček, motorových pil a křovinořezů. U motorových vozidel a motocyklů se vyskytuje jen u veteránů. Magnetové zapalování obsahuje hodně pohyblivých, mechanických součástí a tím je vysoké procento poruchovosti těchto částí.

Magneto má menší průrazné napětí, proto má menší vzdálenost elektrod na zapalovací svíčke a málo energie. To má za následek potíže se zažehnutím směsi. Tento systém se vyznačuje nezávislostí na vnějším zdroji energie. Pracuje zcela bez akumulátoru, kromě občasného seřízení kontaktů přerušovače a kapky oleje na mazací plst' u vačky nevyžaduje další údržbu. Avšak u starších motocyklů, kde nebylo magneto ještě tak vyvinuté se objevovala značná nespolehlivost. Často hodnoty udávané výrobcem na seřízení předstihu nebyly nejvhodnější pro pravidelný chod motoru.

4.2 Bateriové zapalování

4.2.1 Princip činnosti

Bateriové zapalování (viz obr. 14), je také označované jako klasické nebo konvenční.



Obr. 14 - Schéma bateriového zapalování Bosch [3]

Po zapnutí klíčku (2), se přivede spínané + (svorka 15) do zapalovací cívky(3) a do kontaktů přerušovače (6). Při sepnutí kontaktů přerušovače prochází primárním

vinutím zapalovací cívky proud, který vytváří magnetický tok a předává tím energii do magnetického obvodu cívky. Při přerušení kontaktů přerušovače se proud v primárním obvodu rychle zmenšuje a změnou magnetického toku se indukuje v sekundárním vinutí s velkým počtem závitů vysoké napětí. Při rozpojování kontaktů přerušovače může vzniknout nežádoucí výboj na kontaktech a to má za následek opalování kontaktů. Toto se zamezuje paralelně připojeným kondenzátorem (5), který mívá kapacitu obvykle kolem 0,25 μF . Vysoké napětí jde vysokonapěťovým kabelem do víčka rozdělovače, kde prochází do palce a zpátky do víčka k vývodům na vysokonapěťový kabel příslušného válce. Napětí je přiváděno do zapalovací svíčky. Po dosažení potřebného průrazného napětí vznikne mezi elektrodami svíčky výboj a energie z kapacit i zbytkové energie magnetického pole přechází do výboje.

Dle [2], je řečeno, že velikost indukovaného napětí je závislá na rychlosti změny magnetického toku podle vztahu:

$$u = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

N – počet závitů cívky

$\Delta\Phi$ - změna magnetického toku

Δt – změna času

Hlavní části zapalování

Zapalovací cívka

Zapalovací cívka funguje na principu transformátoru, ale má zvětšený magnetický odpor. Je schopna akumulovat energii do vlastního magnetického pole a předat ji do obvodu s vysokým napětím. Toto se dosahuje přerušením magnetického obvodu velkou vzduchovou mezerou. Velikost energie, která je naakumulovaná v magnetickém poli je daná vztahem :

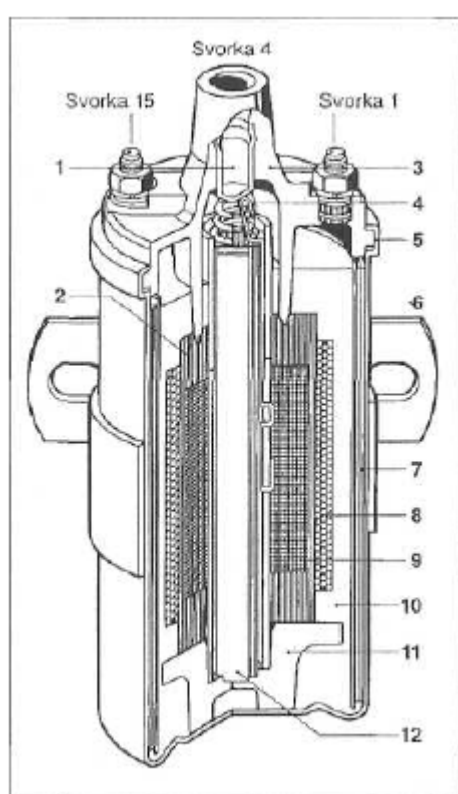
$$E = 0,5 \cdot L_1 \cdot i_1^2$$

L_1 - indukčnost primárního vinutí cívky

i_1 - proud protékající primárním obvodem
zapalovací cívky

Řez zapalovací cívkou a označení jejích částí vidíme na obrázku 15.

Jádro (12) je složeno z odizolovaných plechů, aby omezilo vznik vířivých proudů. Na jádru je navinuté sekundární vinutí (9) a na něm je primární vinutí (8). Jednotlivé vrstvy vinutí sekundárního vinutí je izolováno prokladovým papírem. Odizolováno je primární i sekundární vinutí. Obě vinutí jsou udržovány výstupky ve víku (3) a izolační vložkou (11). Na víku zapalovací cívky jsou přivedené svorky 1, 4 a 15. Svorka číslo 1 je spojení obou vinutí do série a je na něj přivedený signál od přerušovače. Svorka 15 slouží k připojení primárního vinutí k spínanému + po klíčku. A svorkou 4 je vyveden konec sekundárního vinutí přes pomocnou silnou pružinu a vede vysokonapětovým kabelem do víka rozdělovače. [2]



- 1 - vysokonapětový vývod
- 2 - svitek plechů s izolačním papírem
- 3 - izolační víko
- 4 - interní vysokonapětový vývod s pružinovým kontaktem
- 5 - pouzdro
- 6 - upevňovací objímka
- 7 - magnetické plechové opláštění
- 8 - primární vinutí
- 9 - sekundární vinutí
- 10 - zalévací hmota
- 11 - izolační vložka
- 12 - železné jádro

Obr. 15 - Řez zapalovací cívky Bosch [5]

„Zapalovací cívka musí být konstruována pro trvalý provoz, tj. pro trvalý přerušovaný primární proud. U zapalovací cívky pro 12 V je klidový maximální proud 3,5 A, odpor primárního vinutí je asi 4 Ω. Cívka musí vydržet zatížení tímto trvalým proudem po dobu 3 hodin. Krajiní dovolené oteplení je 50 °C.“ [4]

Parametry zapalovacích cívek se pohybují v těchto mezích. [4]

N_1 – počet závitů primárního vinutí 120 až 400

N_2 – počet závitů sekundárního vinutí až 25 000

N_2/N_1 – transformační poměr 40 : 1 až 80 : 1, výjimečně i 100 : 1

L_1 – indukčnost primárního vinutí 3 až 15 mH

R_1 – odpor primárního vinutí 1,5 až 4 Ω

R_2 – odpor sekundárního vinutí 2 000 až 15 000 Ω

Po sepnutí kontaktů přerušovače začíná budící pochod, který končí rozpojením kontaktů. Proud procházející cívkou dosáhne po určité době téměř ustálené hodnoty I_m dané vztahem, který plyne z Ohmova zákona: [2]

$$I_m = \frac{U_B}{R_1}$$

U_B – napětí akumulátoru

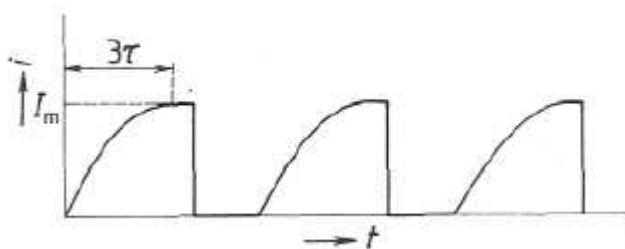
R_1 – činný odpor primárního vinutí zapalovací cívky

Doba, za kterou dosáhne proud ustálené hodnoty je závislá na časové konstantě τ primárního obvodu, která plyne ze vztahu: [2]

$$\tau = \frac{L_1}{R_1}$$

L_1 – indukčnost primárního vinutí zapalovací cívky

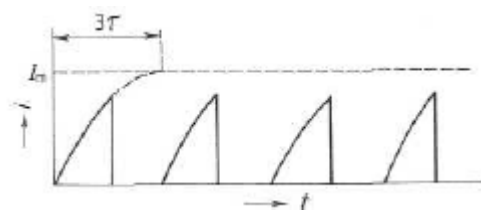
Časová konstanta primárního vinutí bývá $2,5 \cdot 10^{-3}$ s.



Obr. 16 – Průběh primárního proudu při době větší než 3τ [5]

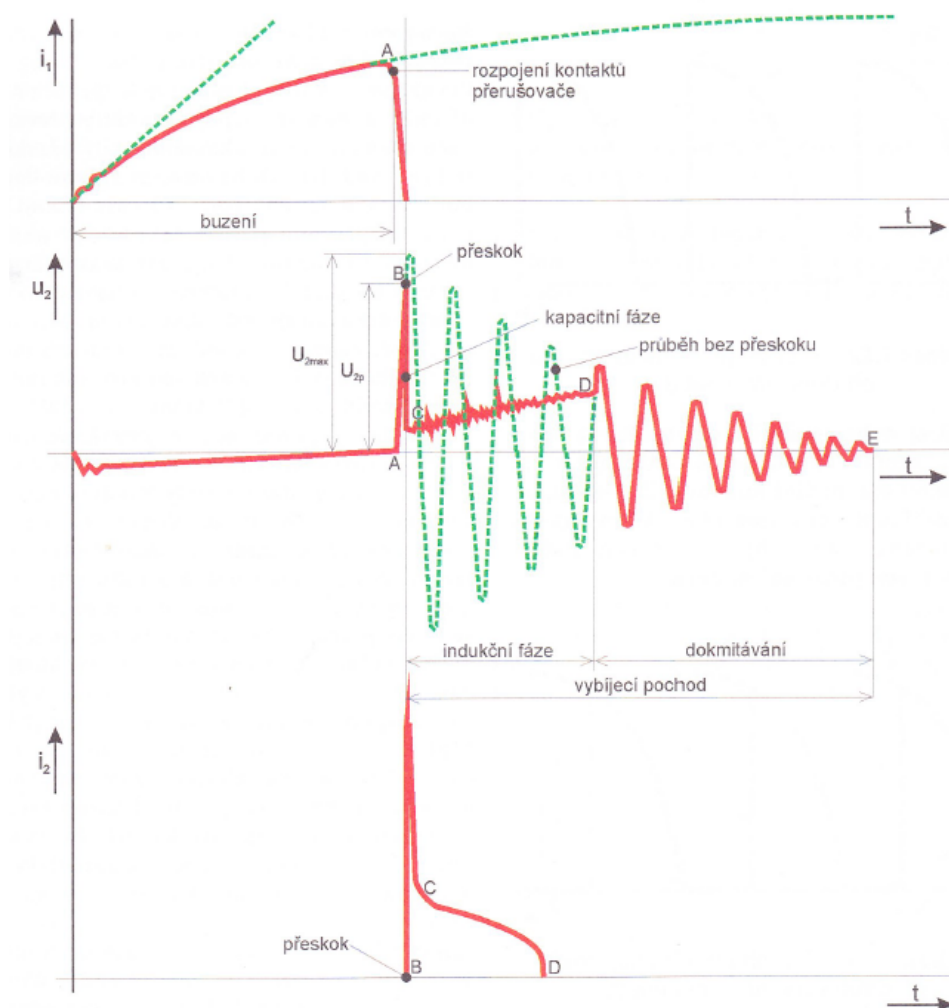
Typický průběh proudu znázorňuje křivka na obr. 16. Primární proud dosáhne maximální ustálené hodnoty za dobu přibližně 3τ . Aby bylo dosaženo ideálních podmínek provozu motoru je zapotřebí, aby byly kontakty přerušovače sepnuty nejméně po dobu právě 3τ . Toto však u reálné zapalovací soustavy z technických důvodů nelze dosáhnout.

Na obrázku 17 je průběh primárního proudu při vysokých otáčkách, kdy už je doba sepnutí přerušovače menší než 3τ .



Obr. 17 – Průběh primárního proudu při době sepnutí menší než 3τ [5]

Na obr. 18 je znázorněn celý průběh mezi dvěma sepnutými kontakty přerušovače (závislost primárního proudu, sekundárního proudu, sekundárního napětí na čase t). O tomto jsem se již okrajově zmínil v kapitole „Základní princip zapalování zážehových motorů“.



Obr. 18 – Průběh napětí a proudu mezi dvěma sepnutími kontaktů v závislosti na čase [2]

Celý děj je popsán mezi body 0 a A, tzn. od okamžiku sepnutí kontaktů (bod 0) do okamžiku rozpojení kontaktů (bod A). V první fázi vybíjecího pochodu, těsně po

přerušení primárního proudu v čase A, až do doby přeskóčení jiskry. Velikost přeskokového napětí závisí na průběhu výboje mezi elektrodami zapalovací svíčky. Nastává tzv. *kapacitní fáze*, vybije se sice poměrně malé množství energie, ale ve velmi krátkém čase, tzn. že hustota energie a tedy i výkon jsou značné (mezi body B a C). Pro zapálení směsi je tato část výboje nejdůležitější. Průrazem velmi rychle klesne napětí mezi elektrodami svíčky z hodnoty U_{2p} na malé napětí výboje. Část mezi C a D je tzv. *indukční část výboje*, do něhož je přivedena poměrně velká část energie naakumulovaná v soustavě. Je to celá řada rychle po sobě jdoucích průrazů a zhasnutí, které se na osciloskopu jeví jako světlé pásmo ohraničené obalovou křivkou těchto výbojů. Část mezi body D a E jsou vlastně tlumené kmity. Na samotné zapalování nemá tato část již vliv, ale musí doznít dříve, než dojde k novému zápalu, aby zbytkové proudy neovlivňovaly další zapalovací cyklus. Vysoké napětí je polarizováno tak, že střední elektroda zapalovací svíčky je proti kostře vozidla záporná. Při obrácené polaritě by muselo být průrazné napětí poněkud vyšší. [2, 5, 6]

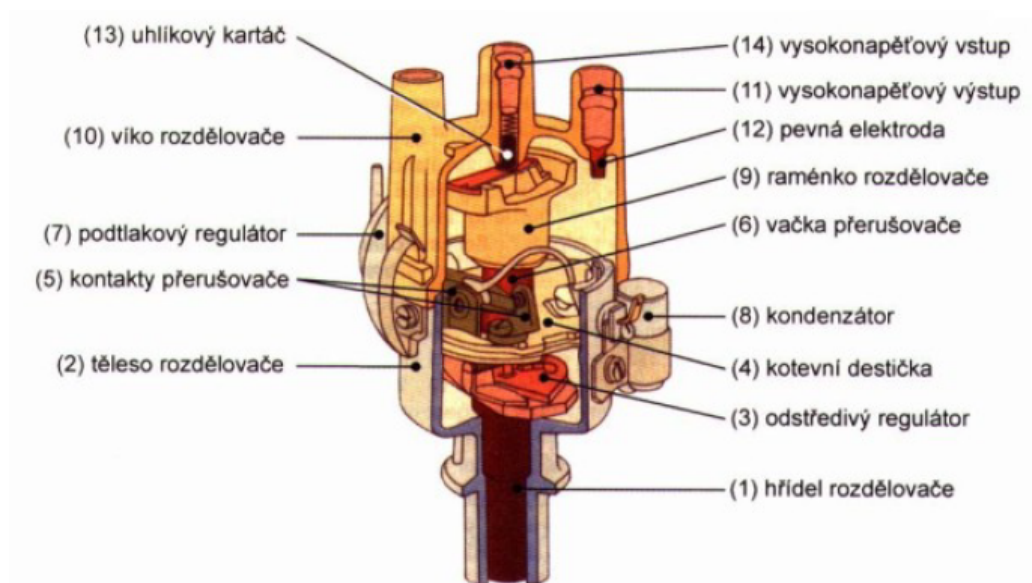
Rozdělovač

V rozdělovači jsou tři funkční celky: 1) přerušovač

2) vlastní rozdělovač

3) regulátor úhlu předstihu zážehu

Na obr. 19 je řez rozdělovače. Rozdělovač je poháněn přes zubovou spojku od vačkové hřídele motoru, která má poloviční otáčky oproti klikové hřídeli motoru. [2]

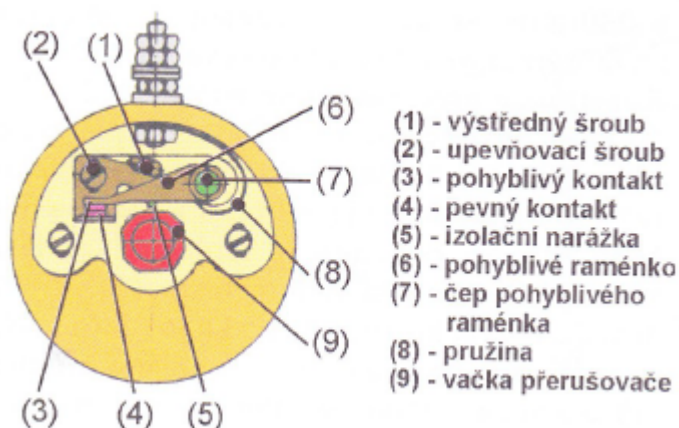


Obr. 19 – Řez rozdělovačem [2]

1) Přerušovač

Přerušovač se nachází v rozdělovači (viz obr. 19 pozice 5). Jedná se v podstatě o spínač ovládající proud do zapalovací cívky. Přerušovač představuje konstrukčně značně náročnou část namáhanou mechanicky a elektricky. Musí mít dlouhou životnost a velkou spolehlivost. Hlavní úlohu přerušovače plní jeho kontakty. Musí vzájemně zajišťovat spolehlivý kontakt bez úbytku napětí, rozpojovat značné proudy a pracovat s velkým počtem přerušení za sekundu. Na spolehlivosti přerušovače značně závisí chod motoru. [2]

O náročnosti svědčí skutečnost, že kontakty spínají a rozpojují proud o velikosti až 3,5 A při napětí 500 V. U čtyřválcového motoru při otáčkách 6 000 min⁻¹ se kontakty rozpojí 12 000krát za minutu (přibližně frekvence 200 Hz). Celý přerušovač je upevněn na kotevní destičce, viz obrázek 20. [2]



Obr. 20 – Přerušovač [2]

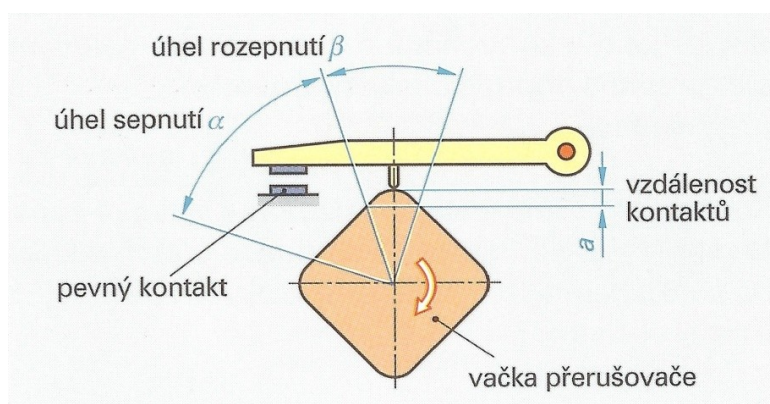
Pohyblivé raménko (6) s kontaktem (3) je uloženo izolovaně na čepu (7). Na raménku je izolační nárazka z tvrzeného textilu nebo plastu (5), která dosedá na vačku (9). Pevný kontakt (4) je možno nastavovat pomocí výstředného šroubu (1) a upevňovacího šroubu (2) a tím je možno nastavovat odtrh kontaktů. Pružina (8) přitlačuje kontakt a zároveň přivádí proud. Vačka (9) je uložena na hřídeli rozdělovače (10).

Kontakty přerušovače mají dvě úlohy:

- v sepnutém stavu připojuje primární vinutí zapalovací cívky na napájecí napětí, (primárním vinutím začne protékat elektrický proud, který magnetuje jádro zapalovací cívky).

- rozpojením kontaktů se určuje okamžik přeskočení jiskry na svíčke (dochází ke změně magnetického pole zapalovací cívky a do vinutí zapalovací cívky se indukuje elektrické napětí).

Vačka má tolik boků, jako je počet válců motoru. Doba sepnutí kontaktů závisí na jejich vzdálenosti, která obvykle bývá mezi 0,3 mm a 0,5 mm. Čím je vzdálenost kontaktů menší, tím je doba jejich sepnutí delší. Nejvhodnější pro seřizování je použít veličinu, která se nazývá *úhel sepnutí kontaktů* (obr. 21). Jeho měření se provádí přístrojem na principu voltmetru, který měří střední hodnotu napětí a ta odpovídá úhlu sepnutí kontaktů.



Obr. 21 – Úhel sepnutí kontaktů přerušovače [6]

Pro tyto úhly platí vztah: [2]

$$\gamma = \alpha + \beta = \frac{360^\circ}{i} \text{ (deg)}$$

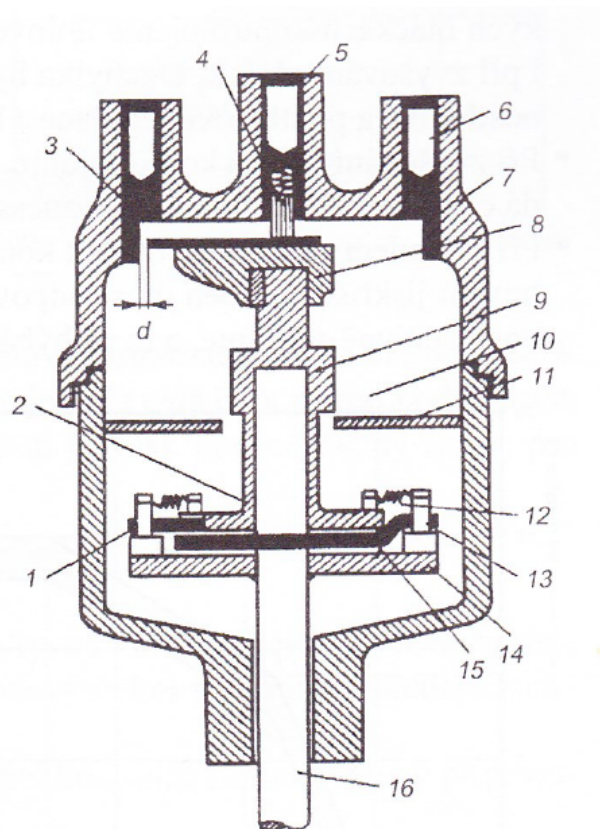
i – počet válců motoru

Dle [2], je známo, že vzhledem k působení vlastní indukčnosti primárního vinutí při buzení cívky se nastavuje doba sepnutí o něco delší než doba rozpojení. V poměru, pro čtyřválcový motor – 50° : 40°, pro šestiválcový motor – 35° - 25° a osmiválcový motor – 30° - 15°. U víceválcových motorů, kde není možno uspořádat všechny kontakty kolem vačky v jedné rovině, jsou umístěny ve dvou nebo více rovinách nad sebou. Povrch vačky musí být tvrzený a leštěný.

2)Vlastní rozdělovač

V zapalovací soustavě, kde zapalovací cívka pracuje pro několik válců, slouží rozdělovač k rozdělování vysokého napětí ke svíčke, která má ve správném okamžiku

zapalovat. Od vačkové hřídele jsou přivedeny otáčky přes zubovou spojku nebo ozubení na hnací hřídel rozdělovače, kde je natočení upraveno odstředivým a podtlakovým regulátorem (princip regulátorů bude podrobně rozepsán v následující části). Nad regulátorem je vačka a hřídel ukončená nasazením raménka rozdělovače. Proud z otáčejícího se rotoru se přivádí na vložky hlavice rozdělovače a tedy k jednotlivým válcům motoru výbojem přes vzduchovou mezeru $d = 0,3 \text{ až } 0,5 \text{ mm}$, která slouží jako předřadné jiskřiště (viz obr. 22). [2, 4]

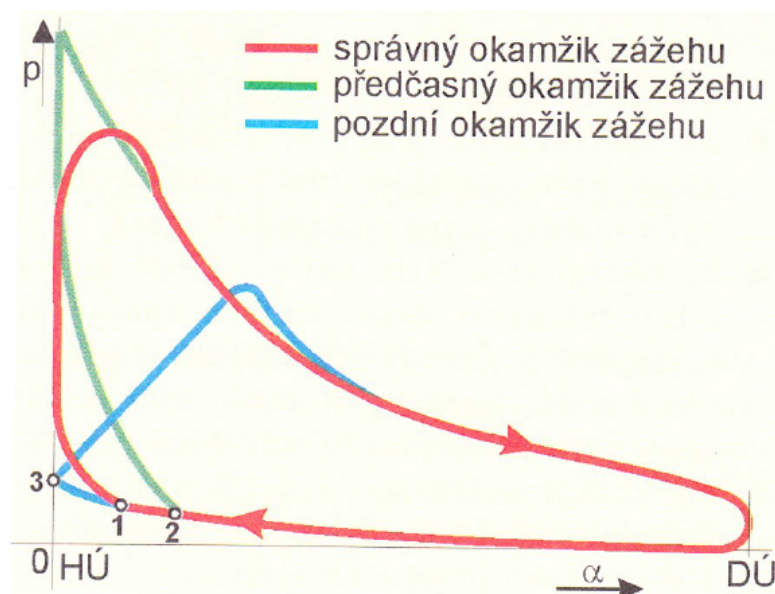


1 – čep natáčení závaží, 2 – kulisa odstředivého regulátoru, 3 – vložka výstupu, 4 – sběrací kartáč s pružinou, 5 – přívod vysokého napětí od ZC, 6 – výstup vysokého napětí na svíčku, 7 – hlavice rozdělovače, 8 – rozdělovací rotor s raménkem, 9 – vačka, 10 – prostor pro přerušovač, 11 – základna přerušovače, 12 – pružina, 13 – závěs pružiny, 14 – základna odstředivého regulátoru, 15 – závaží, 16 – hnací hřídel, d – vzduchová mezera

Obr. 22 – Řez vlastním rozdělovačem [4]

3) regulátor úhlu předstihu zážehu

Okamžik zapálení směsi ve válci je nutno zvolit tak, aby se dosáhlo správného způsobu namáhání klikového ústrojí a požadovaného způsobu hoření směsi. Okamžik zapálení směsi ve válci se volí tak, aby plocha tlakového diagramu byla co největší. Tlakový (indikátorový) diagram je znázorněn na obrázku 23. Okamžik zapálení musí být přizpůsoben rychlosti hoření. [5, 2]



Obr. 23 – Indikátorový diagram [2]

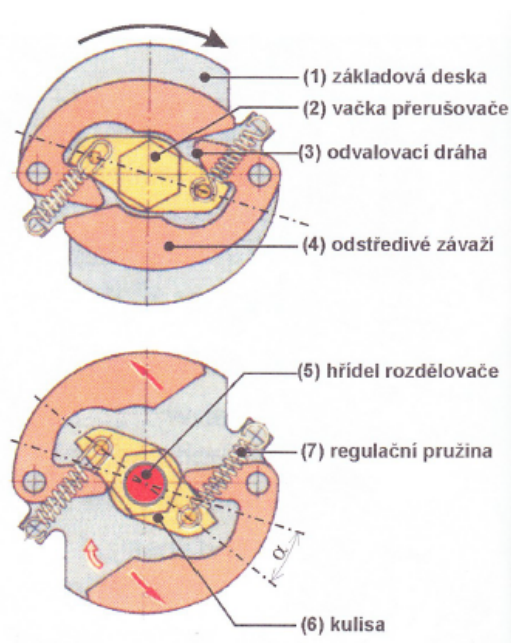
Na obr. 23 je znázorněn indikátorový diagram jako závislost tlaku na úhlu natočení (poloze) klikové hřídele α . Červenou barvou je vyznačen správný okamžik zážehu, modře pozdní okamžik zážehu a zeleně předčasný okamžik zážehu.

Velikost úhlu zážehu závisí na otáčkách motoru. S rostoucími otáčkami je nutno zapálit směs dříve. Na směšovací poměru chudá směs hoří pomaleji, tudíž ji je třeba zažehnout dříve. Na oktanovém čísle paliva dochází k zamezení klepání motoru vlivem detonačního spalování. Na kompresním poměru motoru rychlost hoření roste s rostoucím tlakem.

Změna úhlu předstihu se provádí a) Odstředivou regulací - závislost na otáčkách motoru
b) Podtlakovou regulací - závislost na zatížení motoru

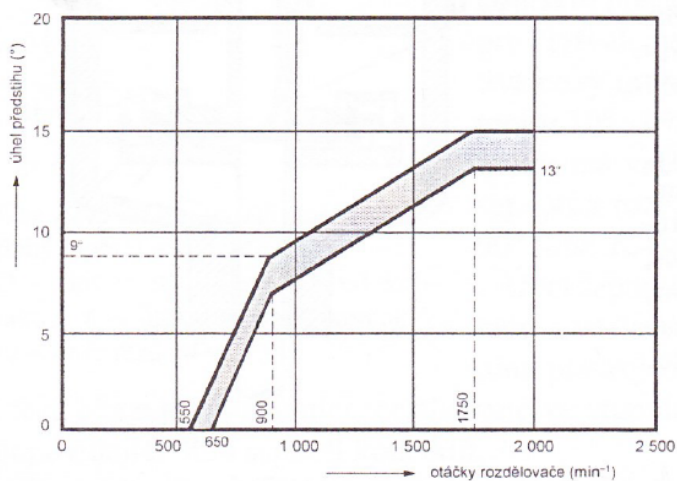
Odstředivý regulátor

Odstředivý regulátor je znázorněn na obr. 24.



Obr. 24 – Odstředivý regulátor [2]

Při zvyšujících se otáčkách motoru se odstředivé závaží pohybuje ve směru červených šipek (viz obr. 24) a úhel předstihu zážehu vzrůstá. Odstředivá závaží jsou v klidové poloze držena pružinkami. Činnost odstředivého regulátoru je patrná z charakteristiky odstředivého regulátoru dle obr. 25.



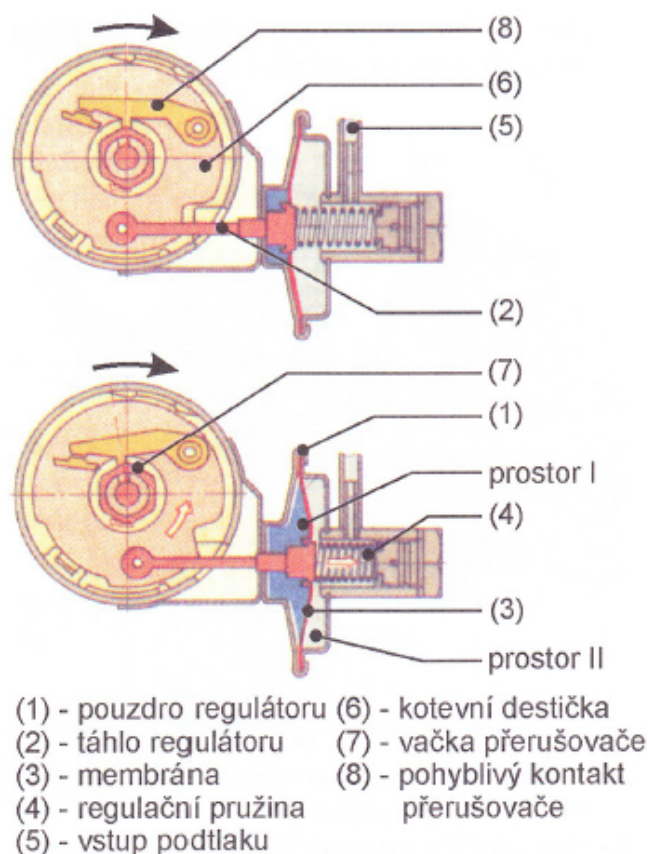
Obr. 25 – Charakteristika odstředivého regulátoru Škoda 120 [7]

Jak je patrné z charakteristiky, tak odstředivý regulátor začne pracovat až při určitých otáčkách, které jsou obvykle vyšší než volnoběžné otáčky motoru. U některých

konstrukci je umístěn odstředivý regulátor do horní části rozdělovače, kde tvoří jeden celek s rotorem (palcem) rozdělovače. [2]

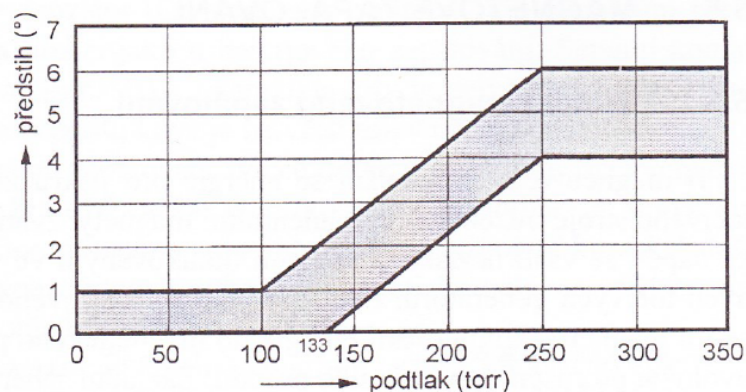
Podtlakový regulátor

Podtlakový regulátor reaguje na změny podtlaku v sacím potrubí v oblasti škrtkové klapky. Základním parametrem je tedy zatížení motoru i výkonu. Podtlaková regulace se zpravidla řeší membránovým mechanismem, jehož princip je na obr. 26. [2]



Obr. 26 – Podtlakový regulátor [2]

Podtlak v sacím potrubí závisí na konkrétním zatížení motoru. Podtlak se přivede do podtlakového regulátoru. Změna polohy napnuté membrány se přivádí přes táhlo na pohyblivě uloženou desku přerušovače. Deska přerušovače zapalování se pootáčí proti směru otáčení rozdělovací hřídelky zážehu, tj. kontakty přerušovače se otevrou dříve. Činnost podtlakového regulátoru ukazuje jeho charakteristika, viz obrázek 27. [2, 6]



Obr. 27 – Charakteristika podtlakového regulátoru Škoda 120 [7]

4.2.2 Hodnocení bateriového zapalování

Z tohoto principu zapalování vychází ostatní druhy zapalování kromě kondenzátorového. U bateriového zapalování je intenzita jiskry závislá na počtu otáček motoru a to tak, že s rostoucím počtem otáček klesá. V porovnání s polovodičovým zapalováním je bateriové zapalování ve většině parametrů horší, to můžeme vidět v tabulce 28.

Druh zapalování		klasické	polovodičové
Průrazné napětí (kV)		12 až 16	30 až 40
Napětí při spouštění (kV)		8 až 10	20 až 30
Zapalovací proud (mA)		40	200
Trvání jiskry (ms)		3	3
Vzrůst napětí ($V \cdot s^{-1}$)		400	1200
Vzdálenost elektrod (mm)		0,6 až 0,8	0,7 až 2,0
Počet jisker (s^{-1})		až 400	až 1000

Tabulka 28 – Porovnání klasického a polovodičového zapalování [2]

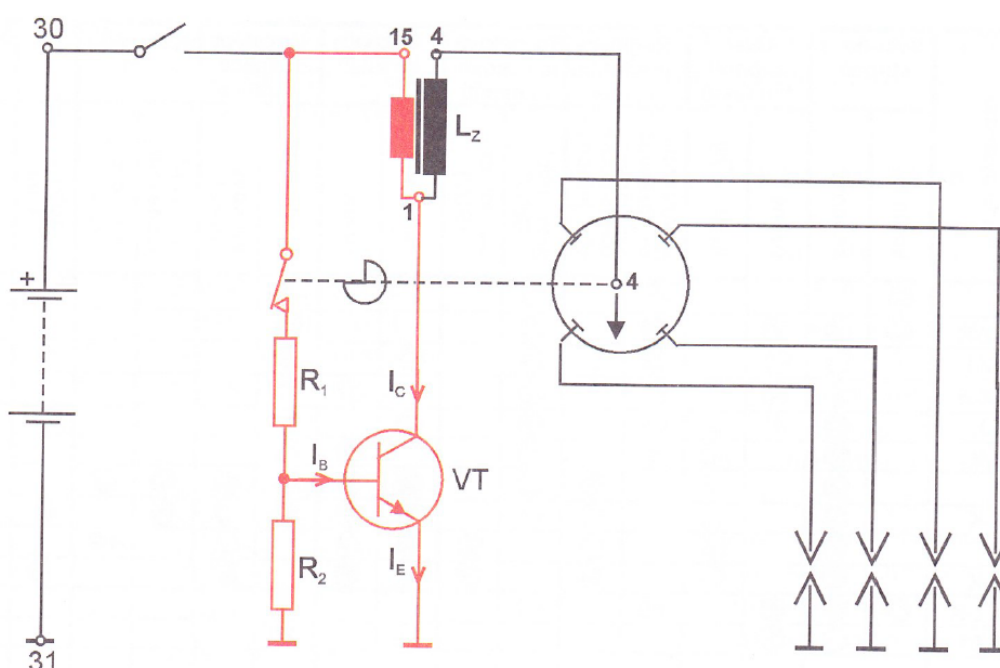
U toho zapalování je hodně mechanických částí, které jsou příčinou vzniku poruch – přerušovač, rozdělovač, podtlakový regulátor a odstředivý regulátor. I přestože jsou kontakty přerušovače přemostěny kondenzátorem, dochází k jejich opalování, a tím častého seřizování i kratší životnosti kontaktů. Přerušovač mechanicky omezuje otáčky motoru - zvládne omezený počet sepnutí. Tento princip zapalování je na druhé straně jednoduchý na údržbu a opravu, ale v dnešní době se již nepoužívá a je nahrazen zapalovacími systémy řízenými řídicí jednotkou.

Bateriové zapalování se nachází v automobilech Škoda 1000 MB až 120,130, první generaci favorit a forman.

4.3 Polovodičové, tranzistorové zapalování

4.3.1 Princip činnosti

Nevýhody klasického zapalování, zejména opalování kontaktů a omezené otáčky mechanického přerušovače vedly k zavedení polovodičového spínání primárního vinutí cívky. U tohoto zapalování jsou všechny součásti zapalování stejné jako u klasického. Jedinou změnou (ale zásadně významnou) je náhrada mechanického přerušovače primárního proudu bezkontaktním spínáním pomocí tranzistorové spínací jednotky. U elektroniky motorových vozidel je ukostřen záporný pól, proto se používá tranzistor typu NPN. viz obrázek 29.



Obr. 29 – Základní schéma tranzistorového zapalování [2]

Na obr. 29 je ještě mechanický přerušovač, který již slouží jen jako spínací člen pro řízení tranzistoru. Pokud jsou kontakty přerušovače rozpojeny, je tranzistor uzavřen a primární proud neprochází primárním vinutím zapalovací cívky. Při sepnutí kontaktů přerušovače dostane řídicí člen tranzistoru impuls, tranzistor se otevře, začne primárním vinutím procházet proud a tím dochází k nabuzení cívky. Přerušovač dokáže přerušit proud do maximální velikosti 5 A. U toho systému se proud nespíná přímo, ale přes tranzistor.

Mezi proudem báze I_B a proudem kolektoru I_C platí vztah:

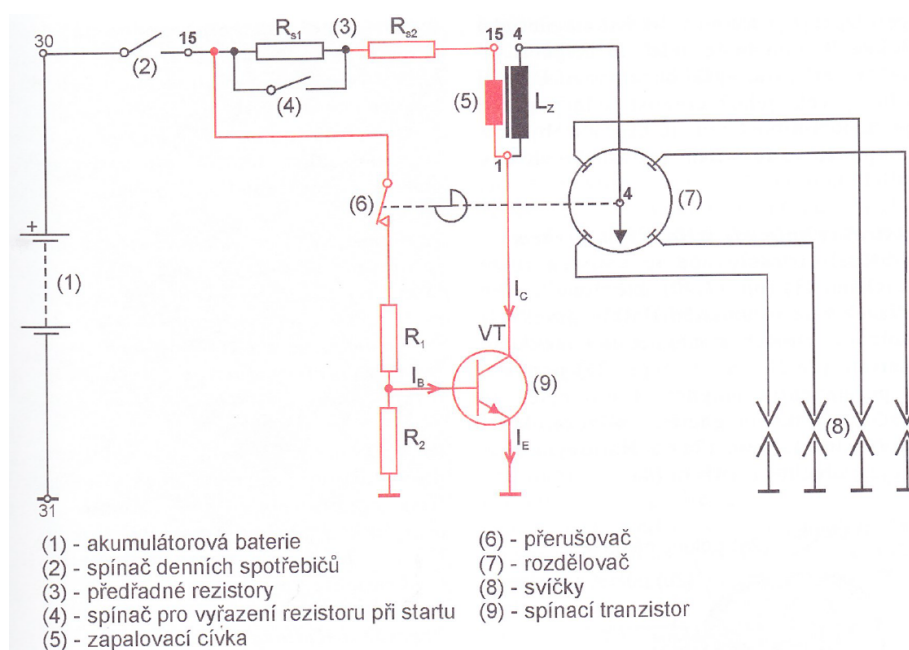
$$h_{21E} = I_C / I_B$$

h_{21E} – zesilovací číselník tranzistoru

Např. při $I_B = 400 \text{ mA}$ a $h_{21E} = 20$ lze spínat proud $I_C = 8 \text{ A}$, tzn., že plní funkci zesilovače proudu. [2, 8]

Tranzistorové zapalování s odlehčením kontaktů přerušovače

Princip činnosti odpovídá základnímu schématu tranzistorového zapalování. Schéma je vidět na obr. 30.



Obr. 30 – Tranzistorové zapalování s odlehčenými kontakty [2]

Řídicí signál do báze tranzistoru je zapojen s odporovým děličem tvořeným odpory R_1 a R_2 . Protože v řídicím obvodu primárního vinutí není indukčnost, není obvykle použitý kondenzátor paralelně zapojený ke kontaktům přerušovače, protože zde je téměř odstraněno opalování kontaktů. [2, 8]

Jelikož stále zůstává mechanický přerušovač, který je zdrojem poruch, je snaha ho nahradit moderním bezkontaktním snímačem.

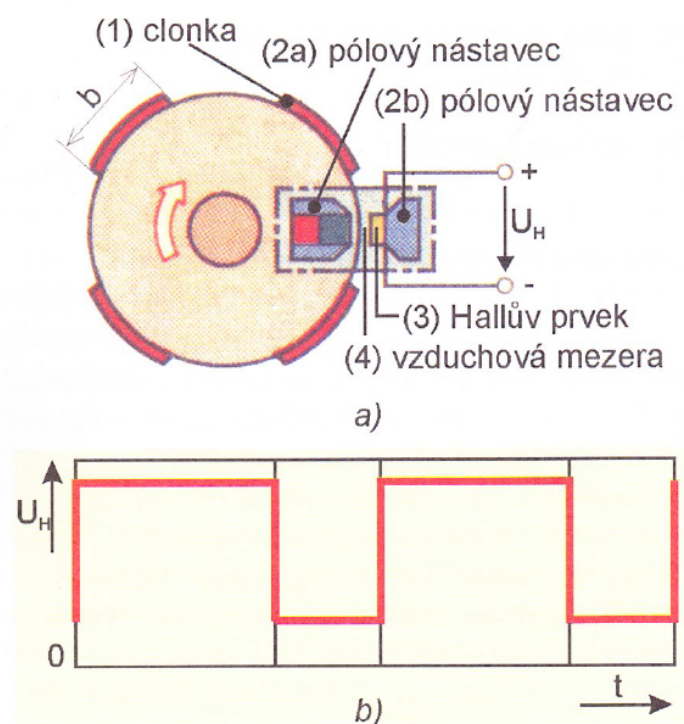
Bezkontaktní snímače

Bezkontaktní snímače impulsů mohou mít různou konstrukci a mohou být poháněny hřídelem rozdělovače nebo přímo vačkovým hřídelem.

Snímač s Hallovým prvkem

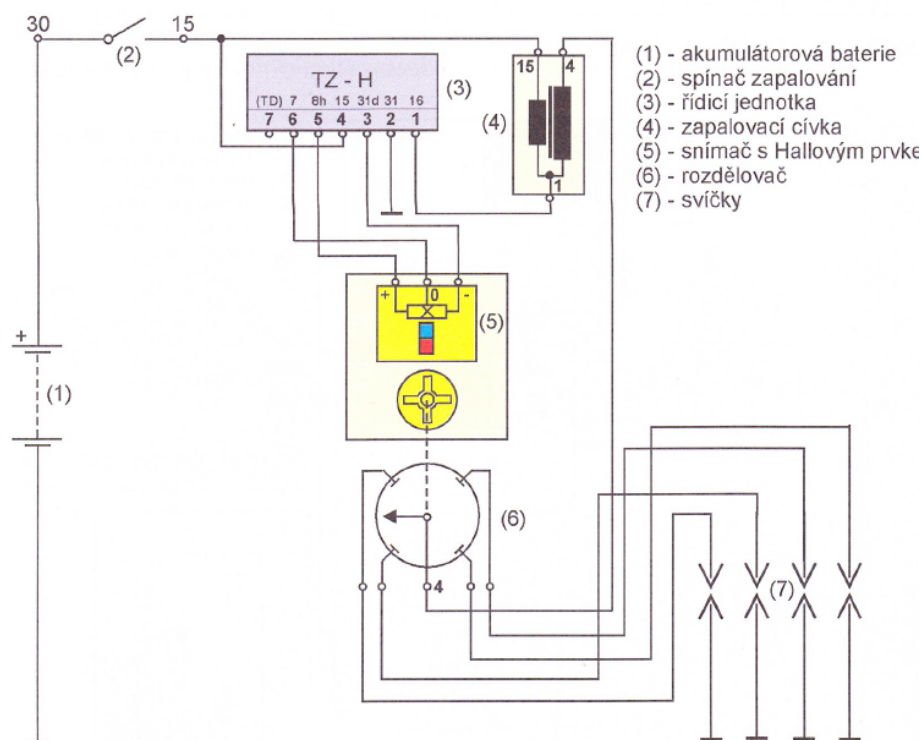
Snímač funguje na principu tzv. *Hallova jevu*, to znamená, že polovodičovou vrstvou vloženou v magnetickém poli napájeném proudem se pohybují elektrony kolmo ke směru proudu a kolmo ke směru magnetického pole. Při určité orientaci proudu a magnetického pole se vytvoří na jedné kontaktní ploše přebytek elektronů a na druhé nedostatek elektronů. Mezi plochami Hallova prvku vznikne Hallovo napětí a po uzavření obvodu bude procházet Hallův proud. [2]

Hallův prvek je umístěn na nosiči (5) s jedním pólovým nástavcem zalitým do plastické hmoty. Pólové nástavce a rotor jsou vyrobeny z magneticky měkkého materiálu. Rotor s clonami (1) a raménko rozdělovače (10) tvoří jeden celek. Magnetická závora je umístěna na pohyblivé desce. (viz obr. 31)



Na obr. 31 a) vidíme konstrukci hallova snímače a na obr. 31 b) vidíme pravoúhlý signál, který tento snímač vysílá. [2]

Provedení zapalování s tímto snímačem vidíme na obr. 32.



Obr. 32 – Zapojení zapalování s Hallovým snímačem [2]

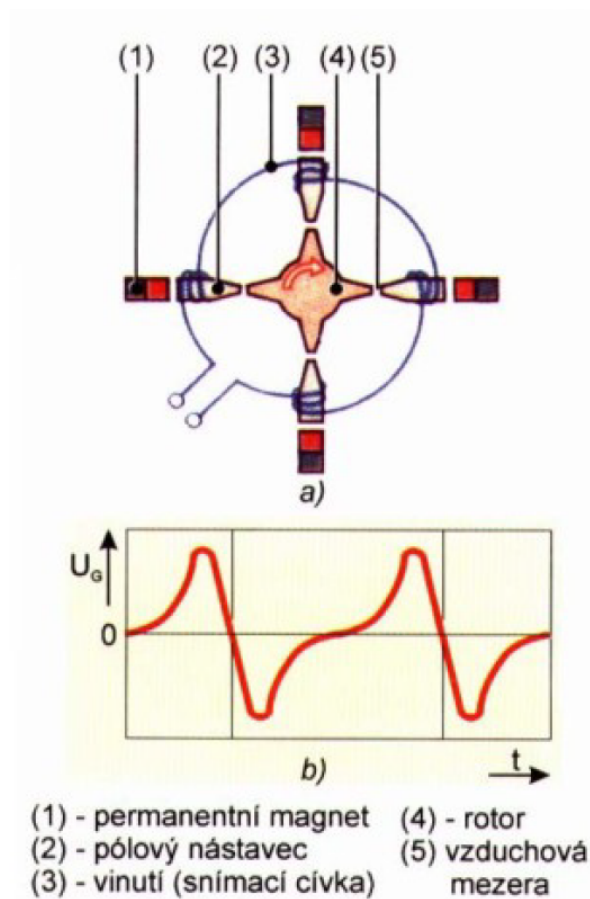
Toto schéma je hodně podobné základnímu principu tranzistorového zapalování. Hlavní změnou je Hallův snímač, který musí být napájen napětím z elektrické sítě automobilu a vysílá pravoúhlý signál do řídicí jednotky motoru. Hallův snímač je připojen třívodičovou svorkovnicí. Napájení a třetí pin je signál otáček. K rozdělení vysokého napětí je mechanický rozdělovač shodný s bateriovým zapalováním.

Indukční snímač

Indukční snímač je v podstatě jednofázový generátor. Tyto snímače mají celou řadu provedení, ale princip činnosti je u všech stejný. Snímač je tvořen statorem a rotorem (obr. 33). Stator je permanentní magnet (1), pólové nástavce (2) a vinutí (3). Rotor má tvar hvězdice poháněné hřídelem rozdělovače. Počet pólů nástavce a počet ramen rotoru je stejný jako počet válců motoru. Mezi rameny rotoru a pólovými nástavci je vzduchová mezera (5). Změny magnetického toku mají za následek indukční napětí ve vinutí (3). Napětí se pohybuje pro nízké otáčky od 0,5 V až po vysoké otáčky do 100 V. Na obr. 33 b) je průběh impulsů. Frekvence střídavého napětí odpovídá počtu jisker za minutu, to lze určit vztahem: [2]

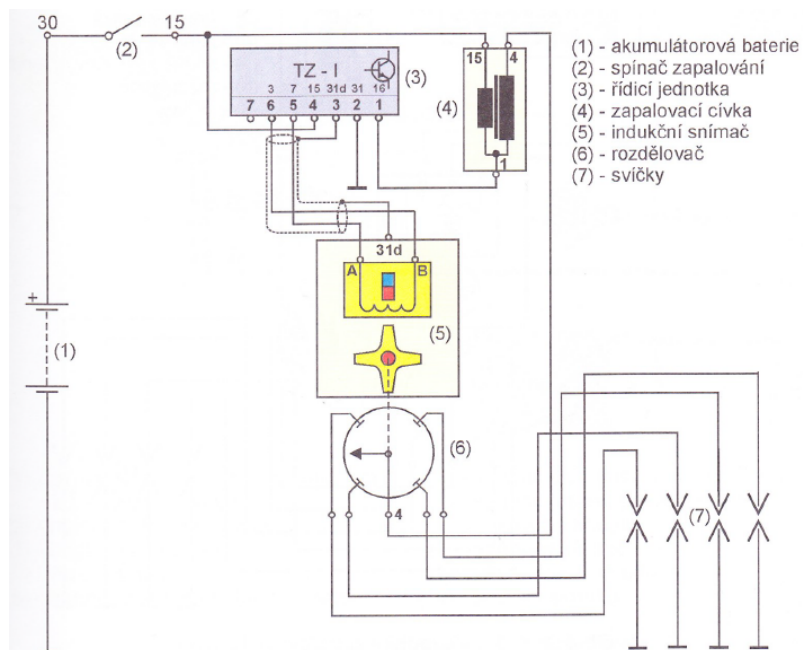
$$f = z \cdot \frac{n}{2} \quad (\text{min}^{-1})$$

z – počet válců motoru
 n – počet otáček motoru (min^{-1})



Obr. 33 – Indukční snímač [2]

Schéma zapalování s indukčním snímačem vidíme na obr. 34.



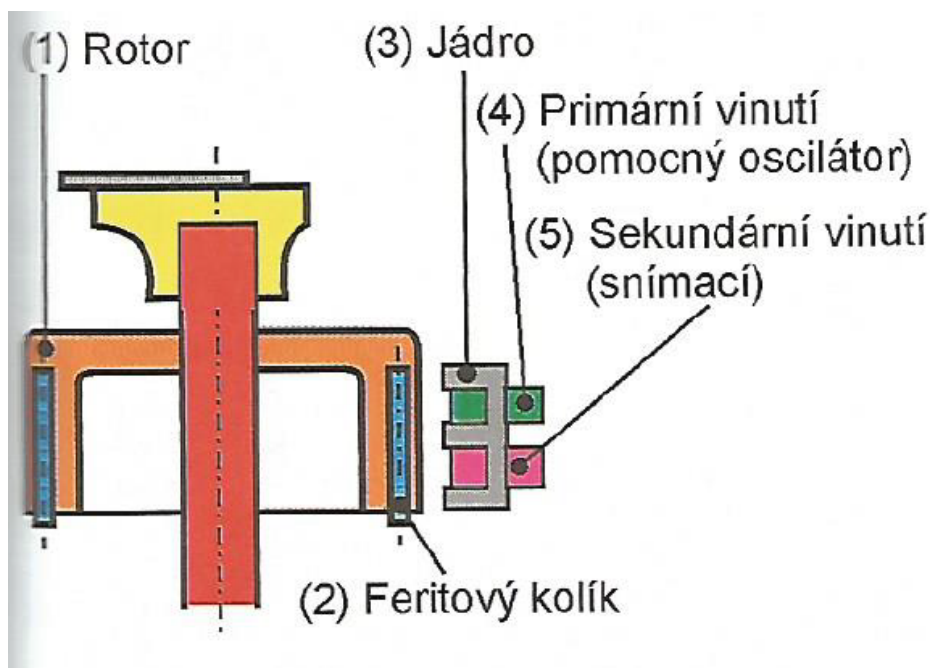
Obr. 34 – Zapojení zapalování s indukčním snímačem [2]

Při vypnutém zapalování a stojícím motoru teče do řídicí jednotky pouze malý řídicí proud asi 0,1 A. Pokud se motor otáčí, protéká proud až 7,5 A od spínače zapalování přes zapalovací cívku na spínací člen tranzistoru. Spínací tranzistor přeruší primární proud, magnetického pole zaniká a v sekundárním vinutí se indukuje vysokonapěťový impuls. Rozdělení vysokého proudu je opět provedeno mechanickým rozdělovačem. [2]

Další typy bezkontaktních snímačů jsou:

Elektromagnetický snímač s oscilátorem (Opus – Lucas)

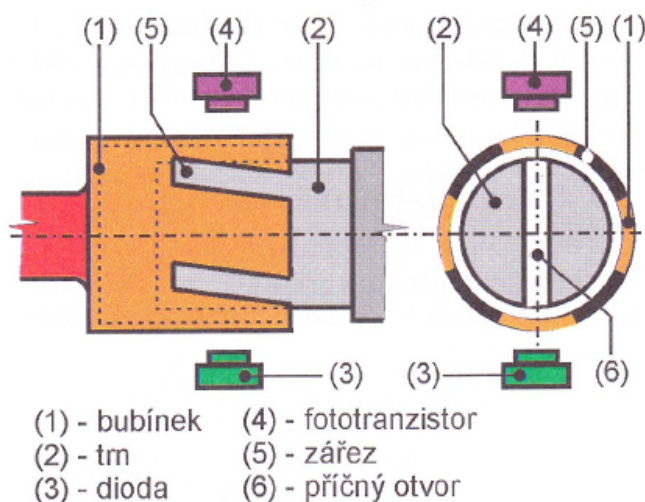
Snímač má rotor tvořený z plastu, který má po obvodu feritové kolíky (2), jejichž počet je shodný s počtem válců motoru, viz obr. 35. Rotor je poháněn od hřídele rozdělovače. Snímač je tvořen transformátorem s feritovým jádrem a dvěma vinutími. V okamžiku, kdy prochází kolem jádra feritový kolík, magnetický obvod se uzavře a v sekundárním vinutí se vytvoří napěťový impuls. [2]



Obr. 35 – Elektromagnetický snímač s oscilátorem [2]

Optoelektrický snímač

Na obrázku 36 je vidět princip činnosti snímače.



Obr. 36 – Optoelektrický snímač [2]

Dle [2] je řečeno: „V bubínku (1), který má stejný počet otáček jako hřídel rozdělovače, jsou zářezy (5). Uvnitř bubínku je trn (2) s příčným otvorem (6). Zdrojem světla je LED dioda (3), která vysílá monochromatické infračervené záření. Účelem tohoto opatření je zamezit rušení vlivem okolního světla. Zdrojem impulsů je fototranzistor (4). V okamžiku, kdy je postavení bubínku takové, že se dva protilehlé zářezy kryjí s příčným otvorem, dopadne záření z diody na fototranzistor a vytvoří se impuls. Šikmé zářezy dovolují regulaci úhlu předstihu zážehu axiálním posuvem bubínku.“

4.3.2 Hodnocení systému

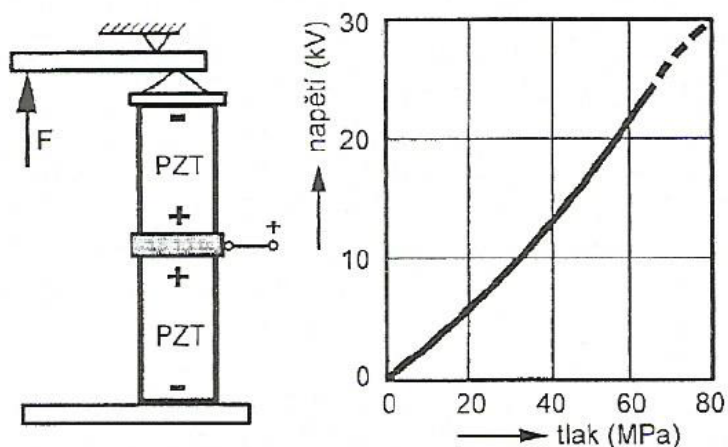
U tohoto typu zapalování je možno použít zapalovací cívku s menší indukčností i menším činným odporem primárního vinutí. Je téměř odstraněno opalování kontaktů přerušovače, ale i přes to byl přerušovač nahrazen bezdotykovými čidly. Hallův snímač je velmi choulostivý a může být snadno zničen. Kontrola tohoto snímače musí být prováděna pouze led zkoušečkou, nesmí být použita zkratová zkoušečka ani ohmmetr. U indukčního snímače je výhoda, že je možno u menších výkonů upustit od regulace úhlu sepnutí kontaktů i od proudové regulace. U tranzistorového zapalování je vždy použitý mechanický rozdělovač vysokého napětí a tím i zdroj poruch a rušení. Z tohoto zapalování je již odvozeno elektronické zapalování. Jsou spekulace, zda toto zapalování patří k elektronickému nebo bateriovému. Z toho důvodu, že zapalování nemá na zapalovací cívce koncový výkonový stupeň ani na řídicí jednotce, kterým se vyznačuje elektronické zapalování, jsem toto zapalování zařadil zvlášť po bateriovém zapalování.

4.4. Piezoelektrické zapalování

4.4.1 Princip činnosti piezoelektrického zapalování

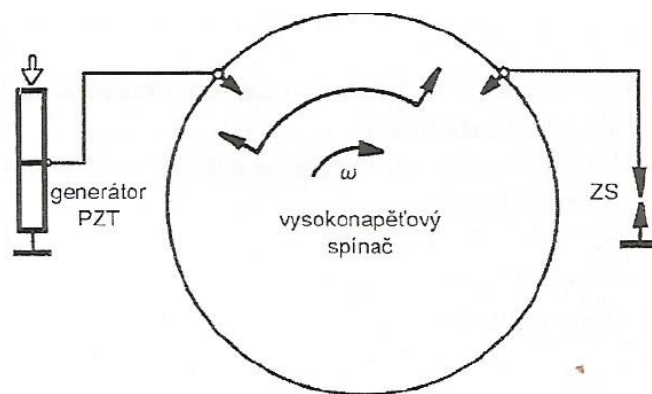
Tento typ zapalování má odlišný princip činnosti oproti předcházejícím způsobům zapalování. U bateriového zapalování vzniká vysoké napětí induktivně v zapalovací cívice. U piezoelektrického zapalování se vysoké napětí získává tlakem (silou) na piezoelektrický materiál. Napětí se získává mechanickým tlakem na piezoelektrický krystal. Přímý piezoelektrický jev nastává v případě, že na krystal působíme vnější silou a tím jej deformujeme. Pokud na krystal připojíme elektrické pole, jehož vlivem dojde k deformaci krystalu, hovoříme o obráceném piezoelektrickém jevu. Činnou částí jsou dva válečky o průměru 9,5 mm a výšce 19 mm z materiálu zirkonátu a titanátu olova (viz obr. 37). [4, 9, 10]

Při tlaku asi 400N se na krystalu vytvoří napětí asi 20kV, které je schopné zapálit směs.



Obr. 37 – Uspořádání piezoelektrického generátoru a napěťová charakteristika [4]

Na piezoelektrických válečkách vznikne elektrický náboj, který je soustředěný na koncích válečků. Zde jsou válečky uspořádány tak, aby se kladný náboj při deformaci soustředil na koncích a záporný mezi válečky. Zde může být náboj odveden mechanickým spínačem (rozdělovačem) obr. 38 a odtud na zapalovací svíčku. Také může samovolně zaniknout po pominutí mechanického namáhání. Piezoelektrické zapalování je na kondenzátorovém typu bez zapalovací cívky či transformátoru. Rychlost nárůstu napětí na svíčce je asi padesátkrát vyšší než u jiných kondenzátorových zapalování. [3, 4, 9, 10]



Obr. 38 – Vysokonapěťový spínač [4]

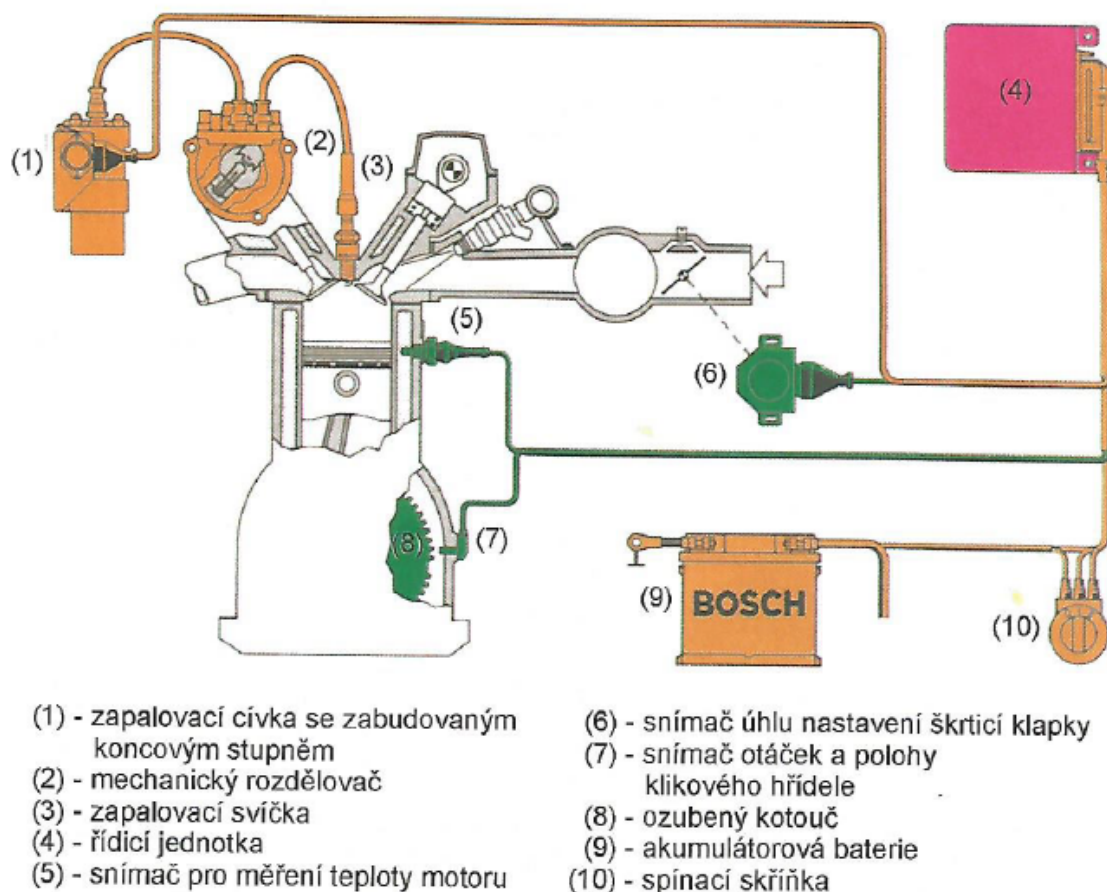
4.4.2 Hodnocení piezoelektrického zapalování

Dle [4], je řečeno, že u motorů automobilů se toto zapalování neosvědčilo. Nevýhodou jsou rozměry rozdělovače, menší přesnost časování výboje a u některých motorů selhání při přechodech nebo při nehomogenní směsi, kdy se projeví nevýhoda krátkého kapacitního výboje. Vysoké požadavky jsou kladeny také na piezoelektrický materiál, který musí vydržet proměnné a vysoké mechanické namáhání. Používá se u malých stabilních nebo přenosných jednoválcových motorů.

4.5. Elektronické zapalování

4.5.1 Princip činnosti elektronického zapalování

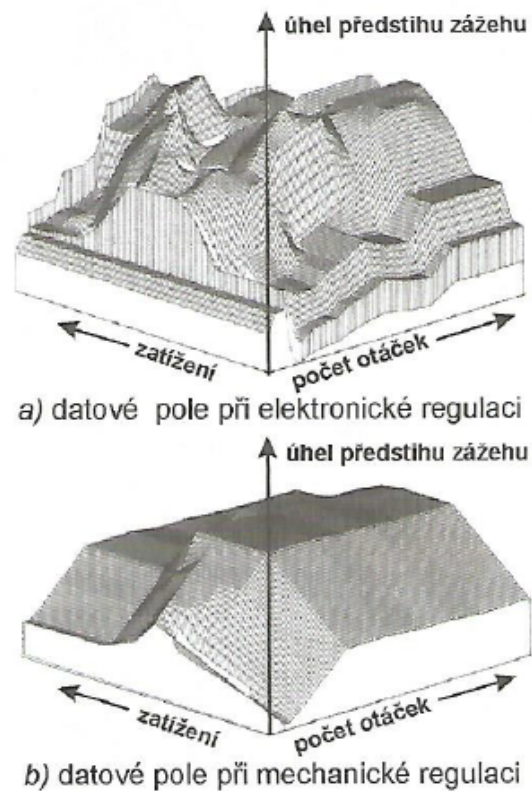
U elektronického zapalování se předstih již nenastavuje mechanicky odstředivou a podtlakovou regulací. Regulátory jsou nahrazeny otáčkovým signálem ze snímače otáček klikové hřídele a snímačem tlaku, dle kterého vyhodnocuje řídicí jednotka zatížení motoru. Dále může být systém doplněn o piezoelektrický snímač klepání motoru. Na obr. 39 je schéma elektronického zapalování označováno jako EZ. [11]



Obr. 39 – Schéma elektronického zapalování [2]

„U zapalování je použitý mechanický rozdělovač vysokého napětí (2), regulace úhlu předstihu zážehu je však prováděna elektronicky. Pro elektronickou regulaci je zapotřebí zajistit měření hodnot požadovaných vstupních veličin. Závislost na otáčkách zajišťuje senzor (7) měřící otáčky motoru, výkon se zajišťuje senzorem, který měří podtlak v sacím potrubí. Mikroprocesor vypočítává vhodný okamžik zážehu a modifikuje odpovídajícím způsobem výstupní signál, který je předáván do řídicí jednotky (4). „ [2]

Z podtlakového senzoru v sacím potrubí získáme signál o zatížení a ze snímače otáček získáme otáčky motoru. Tyto hodnoty umožňují sestavit třírozměrné datové pole pro určení předstihu zážehu. Toto pole umožňuje vyhodnotit a naprogramovat nejvýhodnější úhel předstihu pro každé otáčky, okamžitý výkon, výfukové emise a spotřebu paliva. Na obr. 40 vidíme datové pole pro elektronické zapalování a pro porovnání i datové pole při mechanickém nastavení úhlu předstihu. [2] Paměťové pole je uloženo ve formě tabulky v paměti ROM (Read Only Memory). V paměťovém poli je podle požadavků k dispozici 1000 až 4000 hodnot nastavení úhlu předstihu. [2]

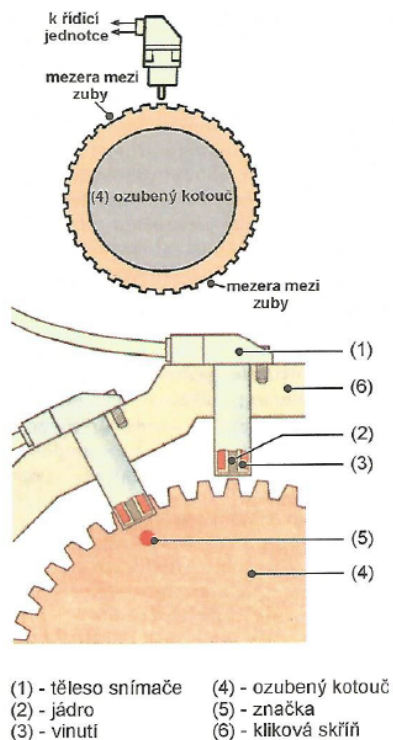


Obr. 40 – Datové pole úhlu předstihu [2]

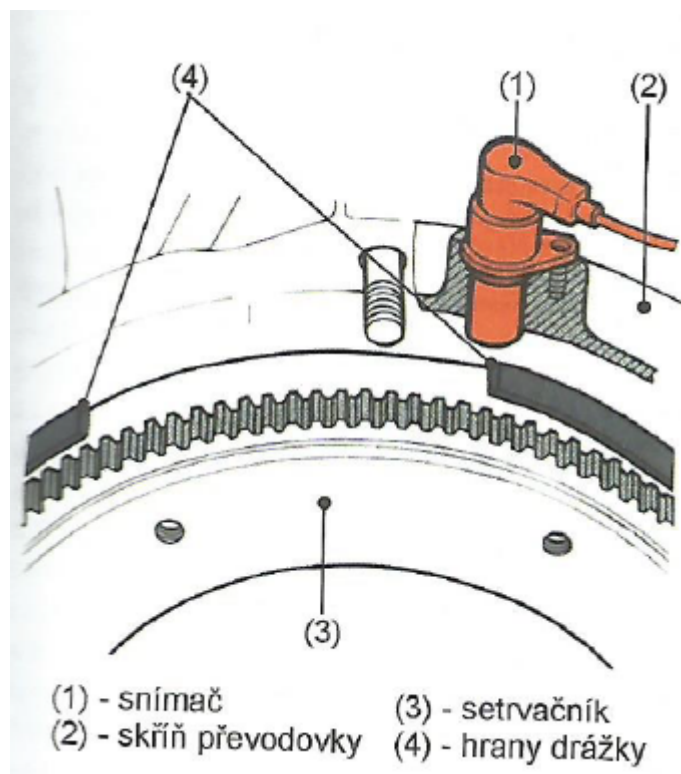
Vstupní veličiny:

Snímač otáček - vyskytují se dvě možnosti - snímání otáček z klikové hřídele
 - snímání otáček z vačkové hřídele

Ke snímání otáček se používají dva druhy snímačů - indukční snímač (obr. 41)
 - Hallův snímač (obr. 42)



Obr. 41 – Indukční snímač [2]



Obr. 42 – Hallův snímač [2]

Zatížení motoru – Zatížení se měří nepřímo podtlakovým senzorem v sacím potrubí. Přesnější zatížení motoru lze měřit pomocí objemu nebo hmotnosti nasátého vzduchu za jednotku času. U motorů se vstřikováním paliva je možno pro stanovení využívat zatížení signál k určení směšovacího poměru. [2]

Nastavení škrtící klapky – Spínač škrtící klapky vysílá údaj o volnoběhu motoru a plném zatížení. Používají se potenciometry se spínačem volnoběhu motoru, viz obrázek 43. Potenciometr škrtící klapky používaný na automobilech Škoda Favorit, Forman a první generace Felicii s motorem 1,3 SPI mono-motronic.



Obr. 43 – Potenciometr škrtící klapky

Teplota – V bloku motoru je umístěné čidlo poskytující signál o teplotě motoru (chladící kapaliny). Nejčastěji se používají čidla na principu změny odporu. Většinou se používají čidla se záporným teplotním součinitelem (negastory – NTC). U těchto termistorů se udává při 20 °C odpor v rozsahu stovek Ω až několik k Ω , který s rostoucí teplotou klesá. Dodatečně nebo místo teploty motoru může být také pomocí dalšího snímače získávána teplota nasávaného vzduchu. [2, 11]

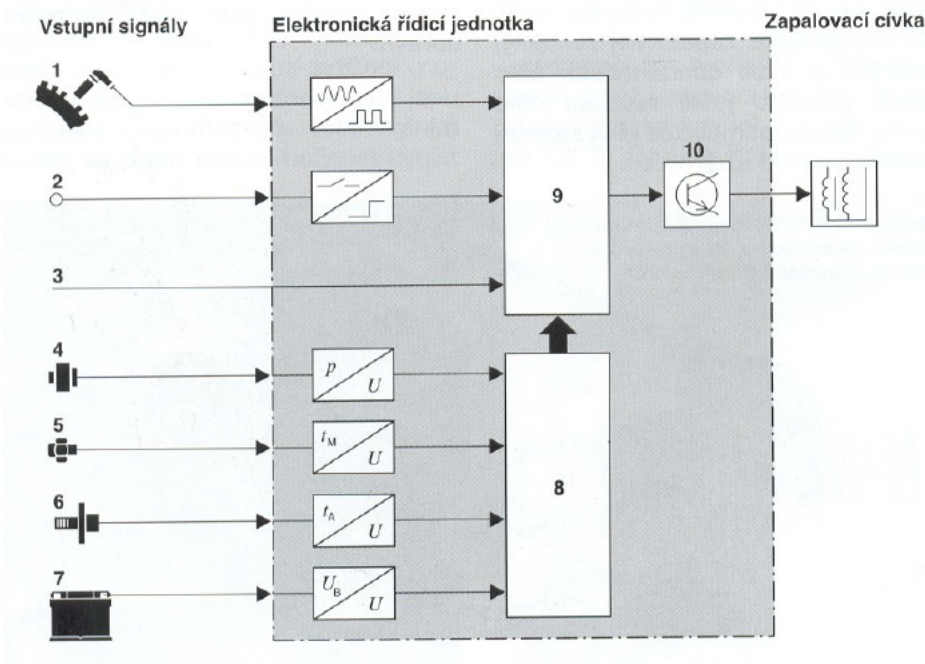
Napětí akumulátoru- Napětí slouží také jako korekční veličina a je snímána řídicí jednotkou motoru. [11]

Zpracování signálu – Tlak v sacím potrubí, teplota motoru a napětí akumulátoru jsou analogové veličiny, které se musí v analogově-digitálním převodníku převést na digitální. Ostatní signály jsou již digitální lze je zpracovat přímo mikropočítačem. Zpracování signálu v řídicí jednotce vypočítává pro každý zážeh nové hodnoty pro předstih a dobu sepnutí, aby mohl být motor v každém pracovním režimu v optimálním nastavení. [2, 11]

Výstupní veličiny

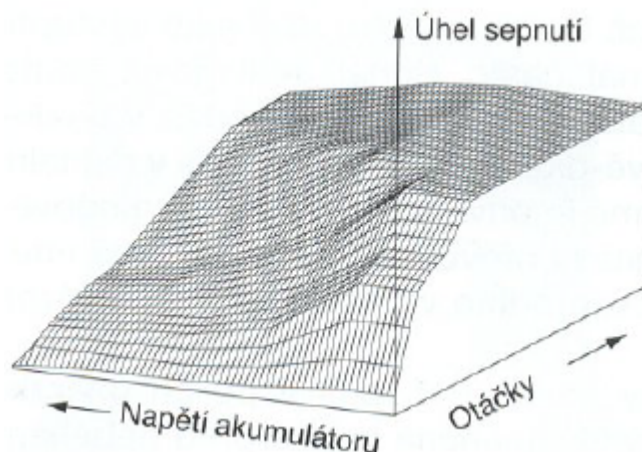
Řídicí jednotka řídí celý proces zapalování motoru, viz blokové schéma obr. 44. Primární obvod zapalovací cívky je ovládán koncovým stupněm elektronického regulátoru.

1 otáčky motoru, 2 signály spínače škrtků klapky, 3 CAN (sériový BUS), 4 tlak v sání, 5 teplota motoru, 6 teplota nasávaného vzduchu, 7 napětí akumulátoru, 8 analogově-digitální převodník, 9 mikropočítač, 10 koncový stupeň zapalování



Obr. 44 – Blokové schéma zpracování signálů v řídicí jednotce [11]

Koncový stupeň zapalování může být zabudován do řídicí jednotky nebo je ve většině případů v kombinaci se zapalovací cívkou. Koncový stupeň ovládá řídicí jednotku tak, aby doba sepnutí byla taková, aby sekundární napětí zapalovací cívky zůstávalo téměř konstantní, nezávisle na otáčkách a napětí akumulátoru. Aby byla každému bodu otáček a napětí akumulátoru nově stanovena doba sepnutí, příp. úhel sepnutí, je zapotřebí pole charakterizující napětí akumulátoru, počet otáček a úhlu sepnutí, viz. charakteristika na obrázku 45. [2, 11]



Obr. 45 – Pole charakteristik úhlu sepnutí [11]

Existují i zapalovací systémy, u nichž je paměťové pole doplněno o regulaci úhlu sepnutí kontaktů, které umožňuje nastavení optimální hodnoty nezávisle pro každý válec motoru. [2]

U elektronického zapalování se často doplňuje o kontrolu klepání motoru. Tento systém se vyskytuje u vozidel Škoda Favorit, Forman a Felicie první generace s motorem 1,3 SPI o výkonech 40 kW nebo 50 kW.

4.5.2 Hodnocení systému elektronického zapalování

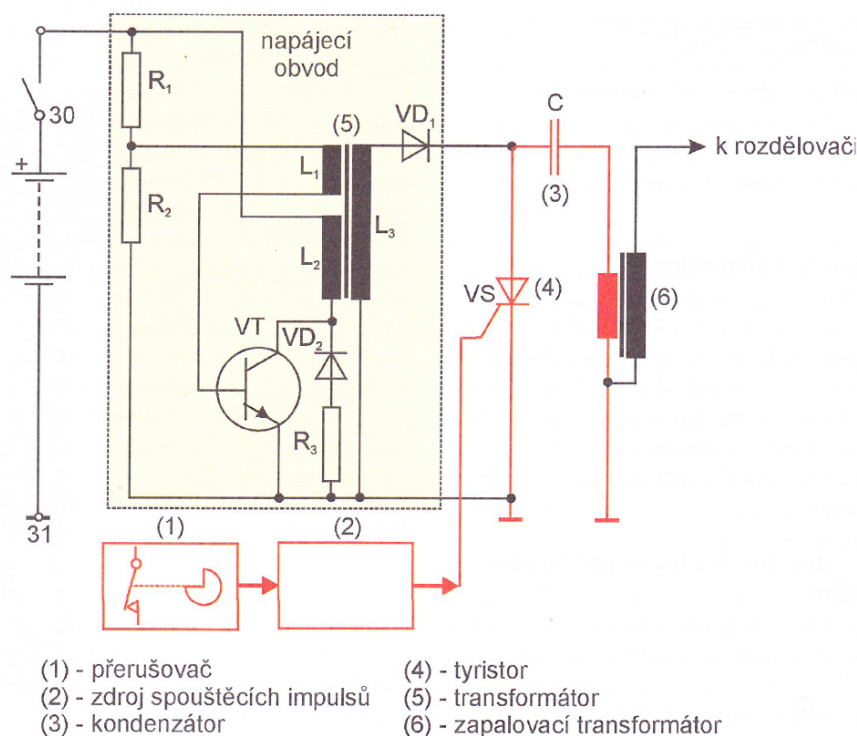
U tohoto systému se naměřené hodnoty posílají do řídicí jednotky. Je stanoven nejlepší okamžik zážehu, což má velký vliv na startovací vlastnosti motoru, spotřebu paliva a volnoběžné otáčky.

Pozitivní vliv má řízení zapalování i na točivý moment při nižších otáčkách motoru, výkon motoru a snížení škodlivin ve výfukových plynech. Značné omezení je, že koncový výkonový stupeň tvoří polovodičové prvky, které snesou jen nízké teploty. Z tohoto důvodu musí být zaručen dobrý odvod tepla z motorového prostoru, kde je umístěn koncový stupeň. Nejčastěji se umísťuje na karoserii na boku motorového prostoru, kde nejsou tak vysoké teploty. Další značná nevýhoda je, že stále nebyl odstraněn mechanický rozdělovač, který je zdrojem závad, nepřesnosti zapalování a rušení. Také jsou zvýšené požadavky na vybavení servisu, kde je na opravy systému zapalování zapotřebí diagnostika a osciloskop. Řídicí jednotka řídí zapalování i další systémy jako je jednobodové vstřikování benzínu u vozidel Škoda.

4.6. Kondenzátorové (tyristorové) zapalování

4.6.1 Princip činnosti kondenzátorového zapalování

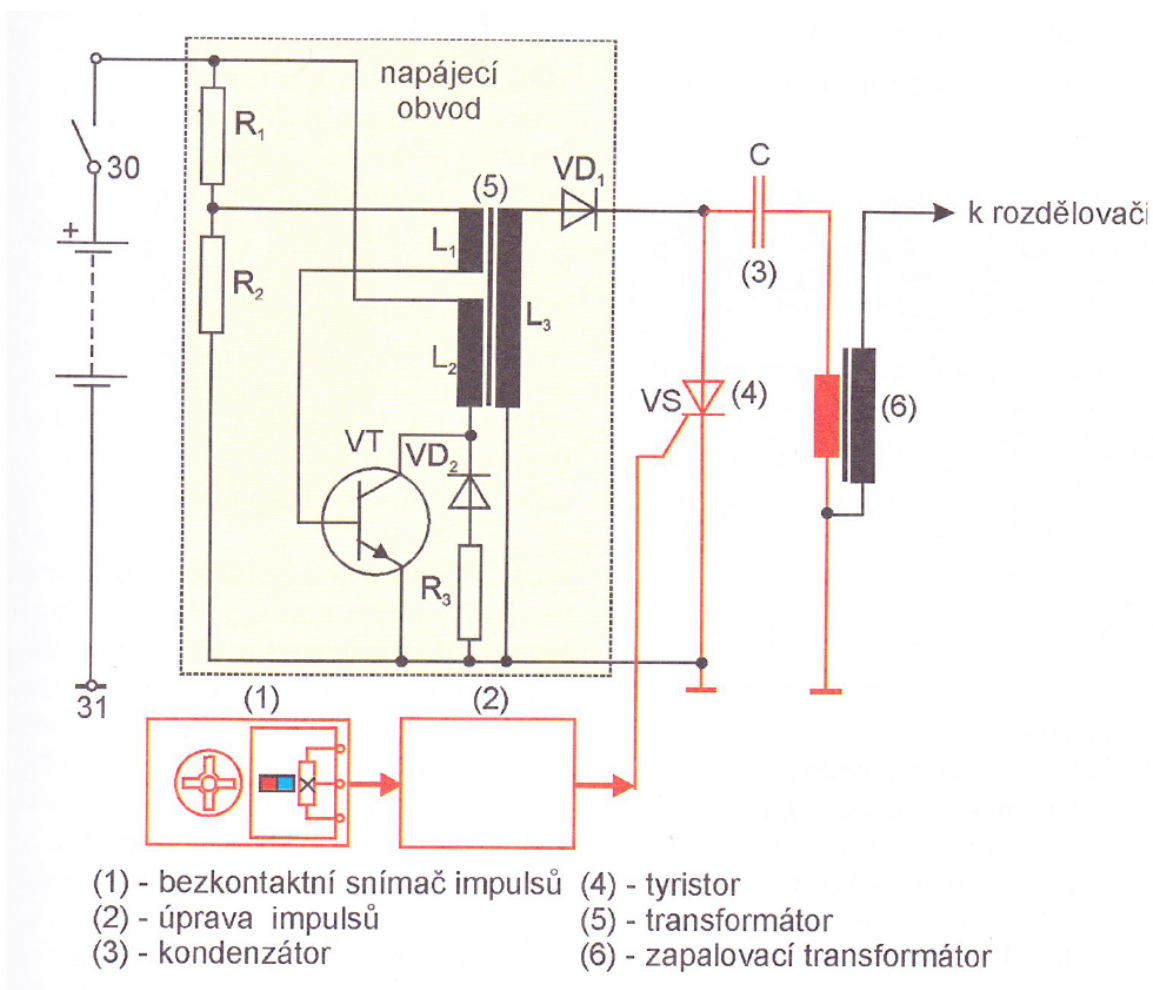
Princip kondenzátorového zapalování (obr.46) spočívá v tom, že energie se nahromadí do kapacity kondenzátoru a odtud se odvádí k primárnímu vinutí zapalovací cívky. U indukčního zapalování se energie shromažďuje v indukčnosti cívky a do vysokonapěťového obvodu se přivádí při rozpojení primárního obvodu. Jako ovládací prvek u kondenzátorového zapalování slouží tyristor a proto se toto zapalování často nazývá jako tyristorové. Je vhodné pro použití u motorů s vysokým počtem otáček a potřebou vysokého zapalovacího napětí, kde vznikají paralelní proudy. Tím pádem se proudy uzavírají mimo jiskřiště svíčky a tak je volba vhodných zapalovacích svíček obtížná. Kondenzátor nabitý na několik set voltů se vybíjí napěťovou vlnou se strmým čelem. [2, 4]



Obr. 46 – Kondenzátorové zapalování s mechanickým přerušovačem [2]

Pro nabití kondenzátoru C (3) se používá stejnosměrný proud o napětí až 450 V. V elektrické síti automobilu je 12 V, proto se musí toto napětí změnit na střídavé. Za tímto účelem je v napájecím obvodu zapojený tranzistor VT a transformátor (5). Kolektor tranzistoru je zapojen na primární vinutí transformátoru L₂ a emitor je ukostřen. Do báze je posíláno napětí z děliče napětí tvořeného z odporů R₁ a R₂. Dioda VD₂ chrání tranzistor proti napěťovým špičkám. Ze sekundárního vinutí L₃ odebíráme

potřebné napětí, které se následně usměrní přes diodu VD_1 a nabíjí kondenzátor C přes spínací prvek tvořený tyristorem, který se ovládá mechanickým přerušovačem (obr. 46) nebo bezkontaktním snímačem (obr. 47). [2, 4]

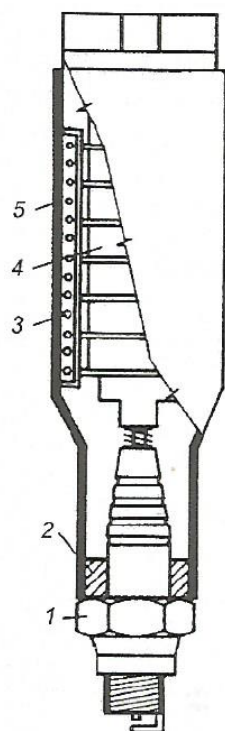


Obr. 47 – Kondenzátorové zapalování s bezkontaktním snímačem impulsů [2]

Toto zapalování lze provést jako jakékoliv polovodičové zapalování třídy tranzistorového, elektronického i plně-elektronického. Vlastnosti jsou dány pochopitelně druhem použité konstrukce. [2] Tento princip zapalování se používá u vozidel Tatra 603 a 613.

Další zapalovací soustava kapacitního principu je zapalovací soustava **SDI** (SAAB Direct Ignition). Tato soustava využívá vysokého napětí na jiskřiště svíčky s nepatrnými ztrátami energie. Každá svíčka je opatřena vlastní minicívkou, která je popsána na obr. 48. Zapalovací impulsy jsou snímány z klikového hřídele. Řídící jednotka řídí průběh zapalování v závislosti na provozních parametrech motoru. Vysoké napětí se u této soustavy transformuje dvakrát. Nejdříve pomocí měniče na 400 V a poté

na zapalovací cívce, která je přímo nasazena na zapalovací svíčke na napětí až 40 kV. Odpadá tedy vysokonapěťový rozvod. [4]



1 – zapalovací svíčka, 2 – pryžové pouzdro, 3 – primární vinutí, 4 – sekundární vinutí, 5 – kovové pouzdro

Obr. 48 – Zapalovací cívka a svíčka systému SDI [4]

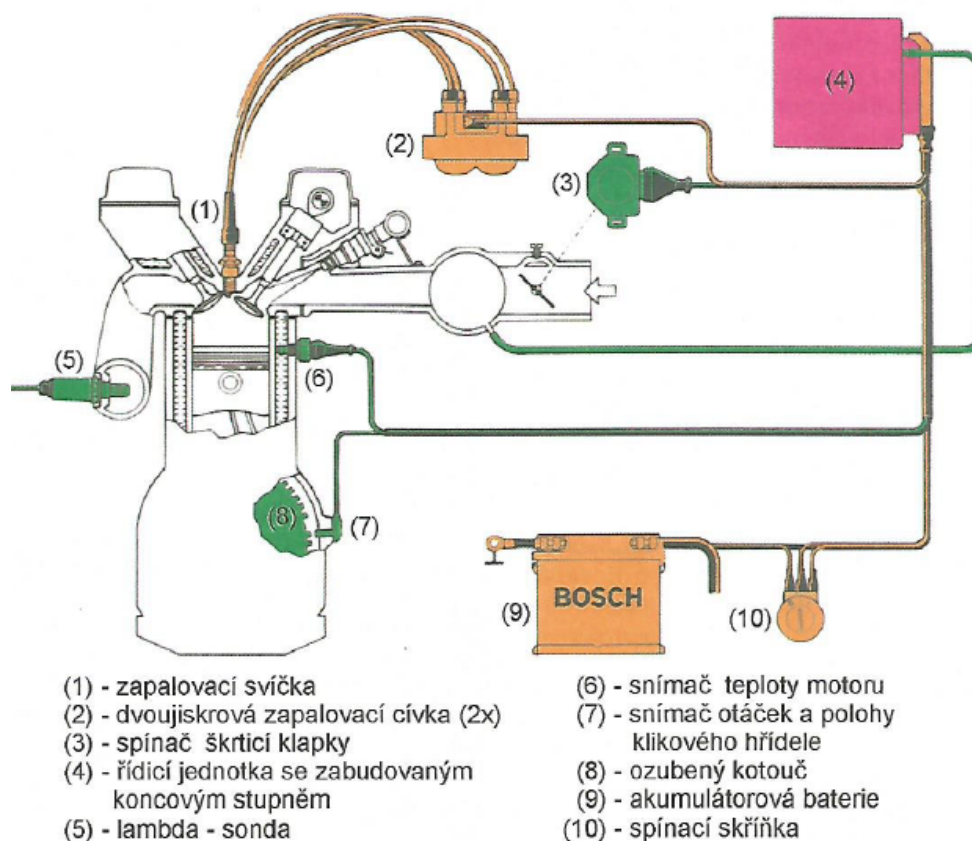
4.6.2 Hodnocení kondenzátorového zapalování

U kondenzátorového zapalování mají zapalovací cívky podstatně menší ohmický odpor a proto je nárůst sekundárního napětí rychlejší asi $8\,000\text{ V}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ (indukční asi $350\text{ V}\cdot\mu\text{s}^{-1}$). U použití mechanického přerušovače je intenzita jiskry závislá na otáčkách motoru. [2] U tohoto zapalování napětí rychle vzroste a tím se snižují ztráty svodem na svíčkách. Zapalování pracuje dobře i když jsou svíčky silně znečištěny. Největší nevýhoda kondenzátorového zapalování je, že tento systém je velmi složitý v porovnání s klasickým indukčním zapalováním a má výrazně nižší spolehlivost. [4] Systémem SDI odpadá vysokonapěťový rozvod a tím pádem i přerušovač. Nárůst napětí je velice rychlý a trvá asi 1 mikrosekundu, což je asi dvacetkrát rychlejší než u klasického induktivního zapalování. Oba tyto popsané systémy mají velké přeskokové napětí, což výrazně zvyšuje energii jiskry na zapalovací svíčke a zajišťuje bezpečné zapálení směsi za všech provozních podmínek a vzdálenost mezi elektrodami na zapalovací svíčke může být až 1,5 mm.

4.7. Plně elektronické zapalování

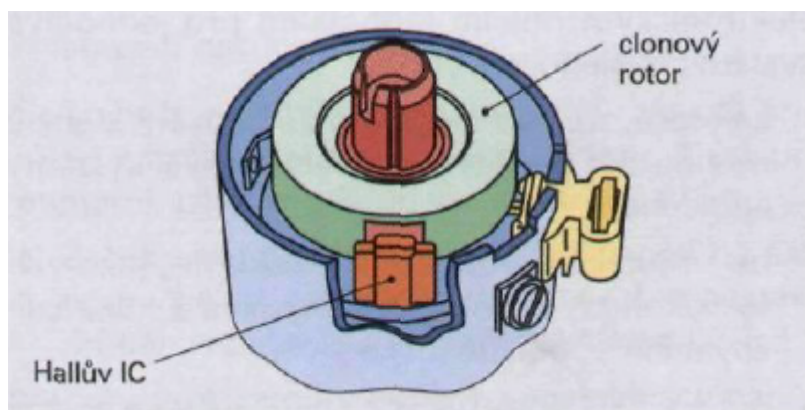
4.7.1 Princip činnosti plně elektronického zapalování

Základní schéma plně elektronického zapalování vidíme na obr. 49. Základní a největší rozdíl od elektronického zapalování je nahrazení mechanického rozdělovače elektrickým. Z toho vyplývá řada výhod jako je podstatně menší hladina elektromagnetických poruch, snížení hlučnosti, snížení počtu vysokonapěťových spojů, žádné pohyblivé části a jednodušší konstrukce. [2, 11]



Obr. 49 – Schéma plně elektronického zapalování [2]

Všechny ostatní části zapalování jsou stejné s elektronickým zapalováním, ale je doplněno o potřebný polohový snímač tzv. „rozpoznání válce“. Jako snímač se používá Hallův snímač poháněný vačkovou hřídelí. Snímač má na clonkovém kole pouze jedno vybrání, které odpovídá konci komprese prvního válce. [6]

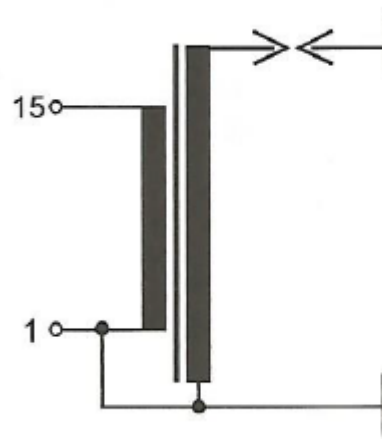


Obr. 50 – Hallův snímač pro rozpoznání válce [6]

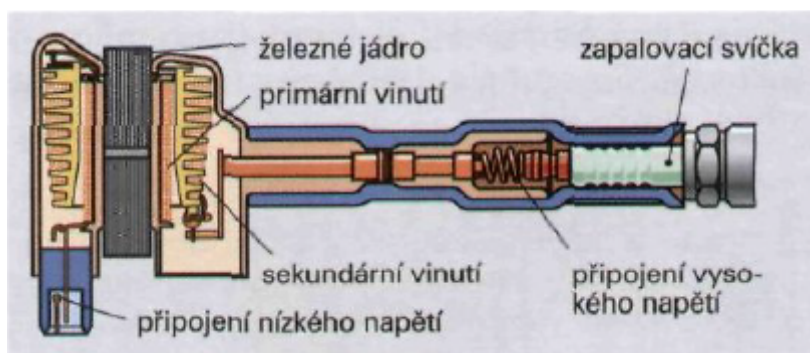
U tohoto typu zapalování se vyskytuje více variant zapalovacích cívek - jednojiskrová, dvoujiskrová a čtyřjiskrová.

4.7.1.1 Zapalovací cívka s jednou jiskrou

Používá se u motorů se sudým i lichým počtem válců, tedy počet zapalovacích cívek je shodný s počtem válců motoru. Na obr. 51 je vidět schéma zapalovací cívky. Každý válec má svou vlastní zapalovací cívku s primárním a sekundárním vinutím, která je umístěna bezprostředně na příslušné zapalovací svíče (obr. 52). [2, 6]



Obr. 51 – Schéma jednojiskrové cívky [2]



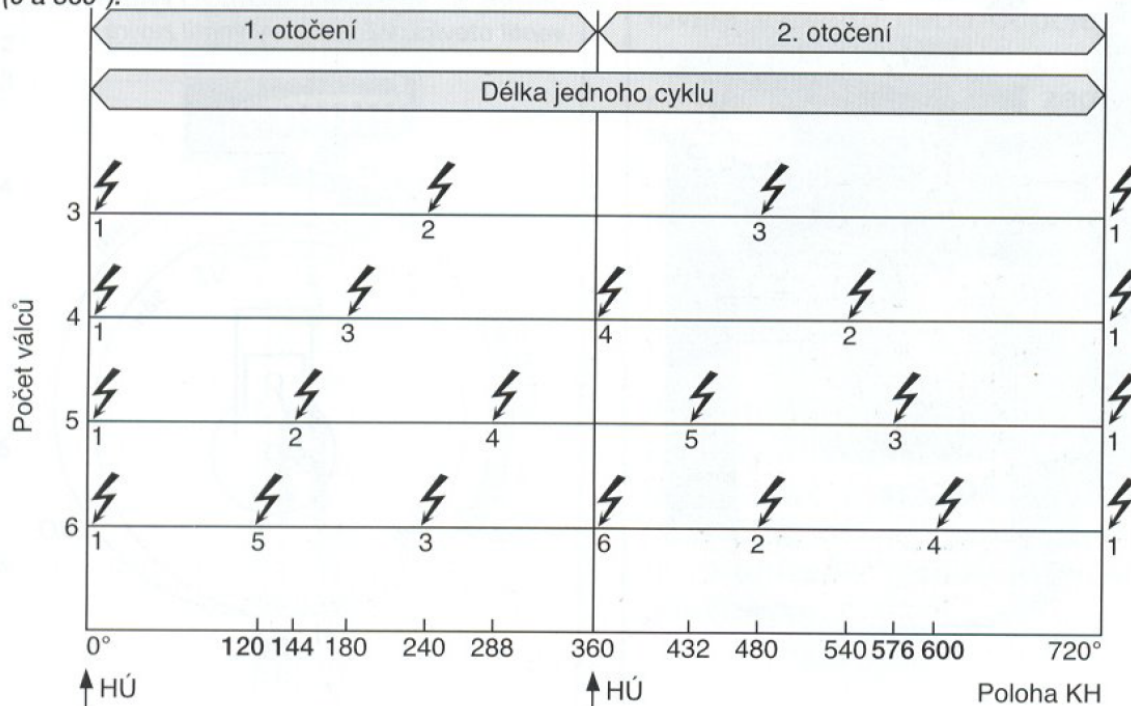
Obr. 52 – Jednojiskrová zapalovací cívka [6]



Vlastní rozdělování vysokého napětí k zapalovacím cívkám probíhá na straně nízkého napětí, a to ve výkonovém modulu řízeném logickým obvodem. U lichého

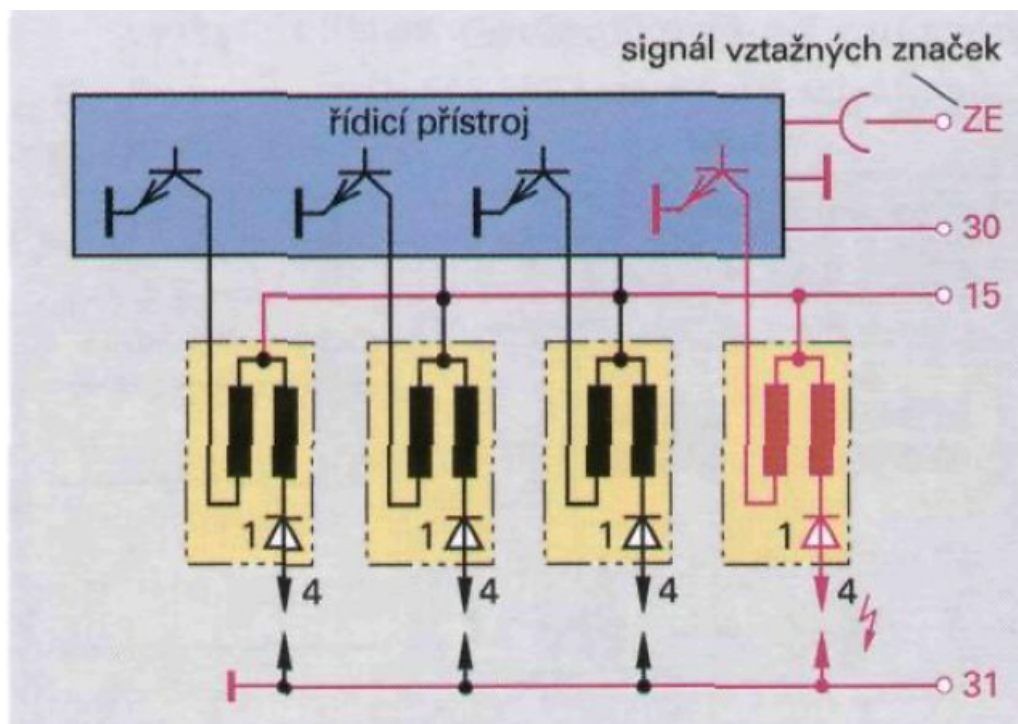
počtu válců probíhá cyklus po dobu dvou otáček klikového hřídele (viz schéma na obr. 53), proto v tomto případě nestačí signál horní úvratě na prvním válci, ale musí být doplněn o signál z vačkové hřídele motoru. [11]

Motory se sudým počtem válců vysílají jednoznačný signál pro zapálení skupin válců při HÚ (0 a 360°).



Obr. 53 – pořadí zapalování u motorů s různým počtem válců [11]

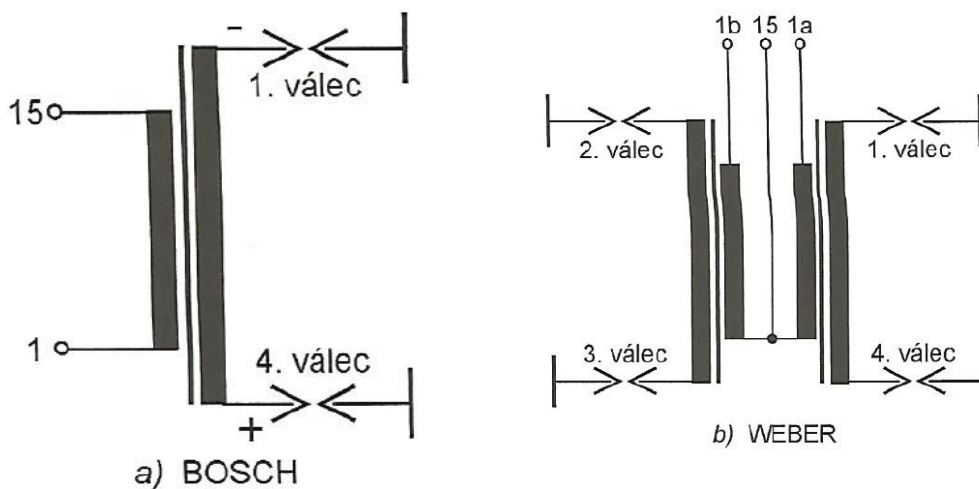
Vzhledem k vlastnostem zapalování se v jednojiskrové zapalovací cívce vytvoří velmi silné magnetické pole, které indukuje vysoké napětí. Může způsobit nechtěný přeskok jiskry na zapalovací svíčke. Toto je zamezeno pomocí zapojené diody v sekundárním obvodu při vytvoření magnetického pole (viz obr. 54). Indukční napětí, které vzniká při vytvoření magnetického pole má oproti napětí vznikajícímu při poklesu magnetického pole obrácený směr (jiskra přeskočí z uzemňovací elektrody na střední elektrodu). [6]



Obr. 54 – Zapojení diody do obvodu s jednojiskrovou zapalovací cívkou [6]

4.7.1.2 Zapalovací cívka s dvoujiskrovou zapalovací cívkou

Tento způsob je použitelný pouze pro motory se sudým počtem válců. Nejčastěji u čtyřválcového motoru, kde jsou použité dvě dvouvysoké zapalovací cívky (viz obr. 55) . Obě cívky jsou střídavě ovládány jedním koncovým stupněm. V okamžiku, kdy řídící jednotka motoru vyšle signál k vytvoření jiskry, vzniknou jiskry na obou zapalovacích svíčkách současně. Jedna jiskra zažehne směs v pracovní době motoru a druhá do doby výfuku, což pomáhá k dohoření směsi a ke zlepšení emisí motoru. [2, 6]



Obr. 55 – Dvoujiskrová zapalovací cívka Bosch a Weber [2]

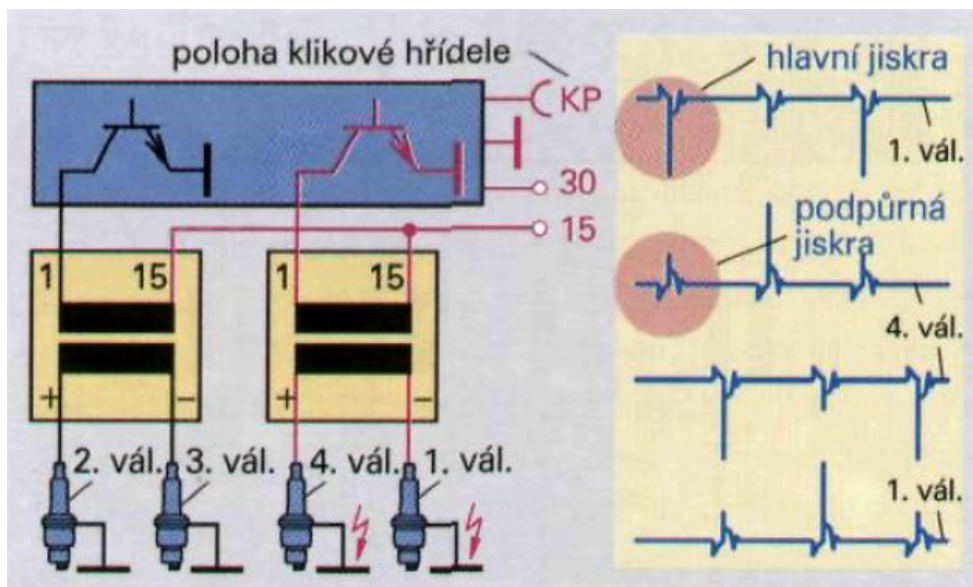


Obr. 56 – Celá zapalovací cívka Bosch [11]

Také druhá dvoujiskrová zapalovací cívka vytvoří vždy dvě jiskry, ale ty jsou vůči těm předchozím posunuty o 180° otočení klikové hřídele. Například u čtyřválcového motoru lze uvést, že se vždy zapalují současně 1. a 4. a potom 3. a 2. válec. Kromě toho se dvoujiskrová zapalovací cívka zapaluje jako první a vyžaduje signál, který označí počátek jedné otáčky. Dle [11], je řečeno „*V zobrazeném příkladě určuje, signál horní úvratě, že musí být provedeno zapálení u skupiny válců 1. a 4. Počítač zjistí, kdy dojde k pootočení klikové hřídele o 180° a zařídí pak zapálení ve skupině válců 2. a 3. pomocí druhé dvoujiskrové zapalovací cívky. Na začátku druhé otáčky přichází opět signál horní úvratě a zapálení ve skupině válců 1. a 4. „*

Díky tomuto principu je zamezeno výpadku ze synchronizace pořadí zapalování. Tento způsob je výhodný i pro motory dvouválcové a šestiválcové - pořadí zapalování viz obrázek 53. [11]

Vzhledem k předem danému směru proudu v sekundárním vinutí přeskočí na jedné zapalovací svíčke jiskra od střední elektrody k uzemňovací elektrodě na střední elektrodu. Na obr. 57 je schéma zapalování s použitím dvou dvoujiskrových cívek a vpravo je obrazovka osciloskopu popisující sekundární napětí na zapalovací cívce. [6]

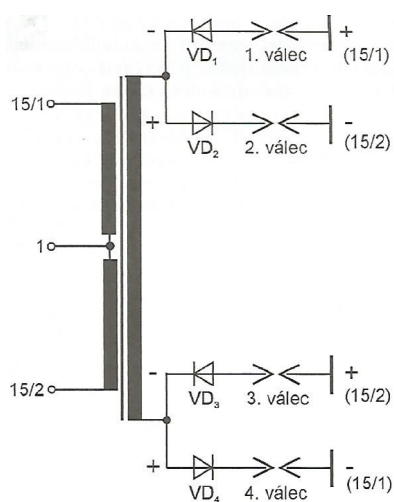


Obr. 57- Schéma s použitím dvoujiskrových cívek s osciloskopem sekundárního napětí [6]

4.7.1.3 Čtyřjiskrová zapalovací cívka

Dle [2], má cívka dvě primární vinutí se společným vývodem a jedno vinutí sekundární (viz obr. 58). Ve výstupech sekundárního vinutí jsou zapojeny diody VD_1 až VD_4 , které zajišťují správné pořadí jisker. Průběh zapalování je následující:

- nízké napětí na svorce 15/1 – otevřené diody VD_1 a VD_4 – zážeh v 1. válci
- nízké napětí na svorce 15/2 – otevřené diody VD_2 a VD_3 – zážeh v 2. válci
- nízké napětí na svorce 15/1 – otevřené diody VD_1 a VD_4 – zážeh v 3. válci
- nízké napětí na svorce 15/2 – otevřené diody VD_2 a VD_3 – zážeh v 4. válci



Poznámka. Označení svorek 15/1 a 15/2 není ani v ČSN ani v DIN.



Obr. 58 – Čtyřjiskrová zapalovací cívka [2]

U dvoujiskrových i čtyřjiskrových zapalovacích cívek jsou zapojeny dvě zapalovací svíčky v sérii. U obou provedení zapalovací cívky vznikají současně dvě jiskry - jedna v pracovní fázi motoru a druhá ve válci s výfukovým zdvihem. Z důvodu vzniku jiskry při nízkém tlaku v době výfuku je nutné napětí v řádu kilovolt. Kromě toho je v každé skupině válců jedna zapalovací svíčka „nesprávně“ přepólovaná, tj. že střední elektroda je kladná (obvykle je záporná). Tím také vzniká požadavek na vysoké napětí. [2, 11]

Provedení dvoujiskrových i čtyřjiskrových zapalovacích cívek je v plastovém pouzdru. Kompaktní konstrukce a velká plocha na vrchní straně umožňují u těchto cívek dobré oddělení vysokonapěťových výstupů. Chlazení je provedeno vytažením železných jader ven a připevněním na karoserii automobilu. [11]

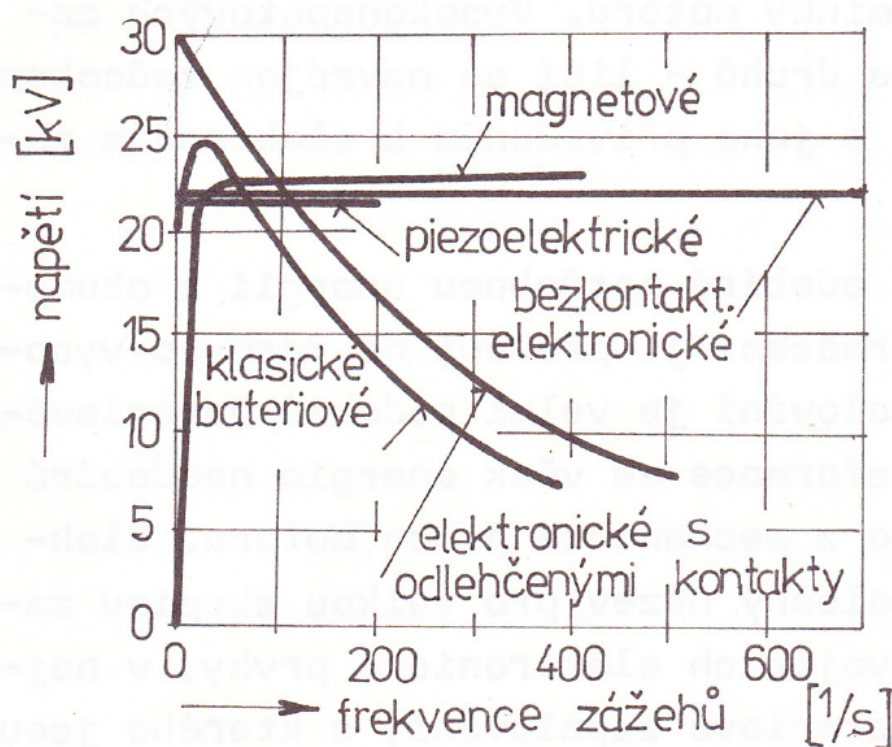
4.7.2 Hodnocení plně elektronického zapalování

V dnešní době je toto zapalování nejvíce používané u moderních automobilů. Systém má velmi dobrou spolehlivost, ale v případě poruch je třeba odborná dílna a speciální diagnostické zařízení. Tyto systémy vykazují úsporu paliva, snížení emisí a zajišťují spolehlivé zapalování i při nízkých teplotách.

5. Porovnání zapalovacích systémů dle parametrů

5.1 Porovnání nejvyššího napětí výboje v závislosti na frekvenci zážehu

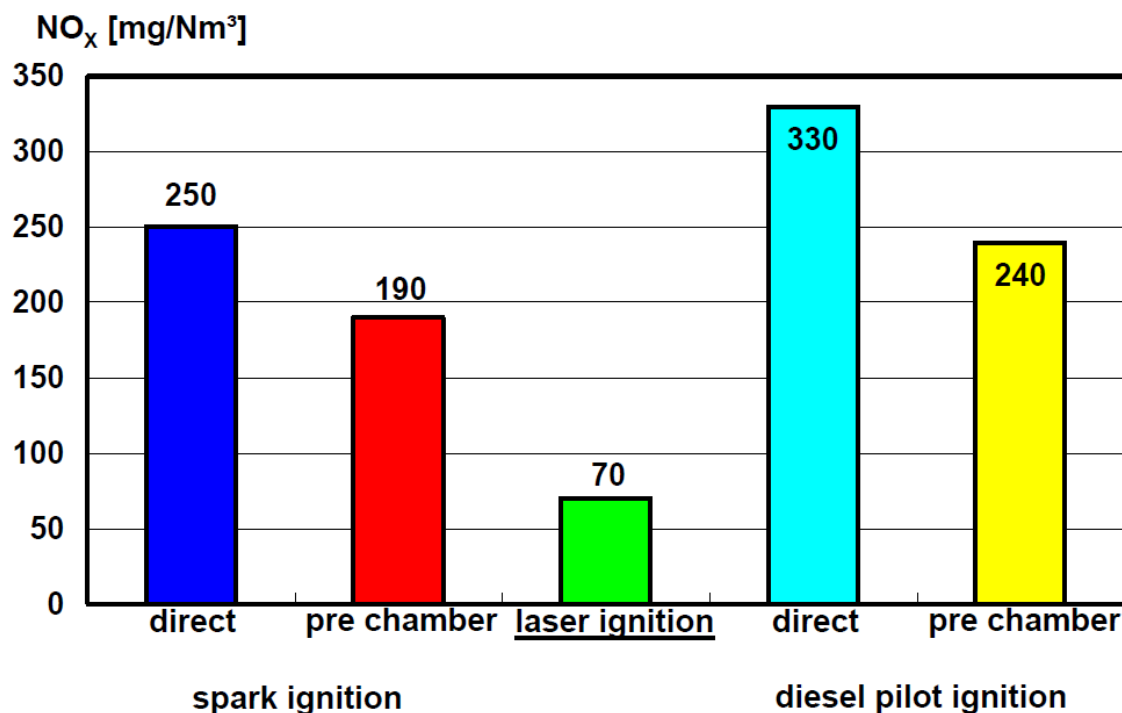
Zapalovací systémy nejlépe hodnotí závislost nejvyššího napětí na otáčkách motoru. Nejlépe je tato závislost vidět u starších systémů (viz obr. 59). U novějších plně elektronických je tato závislost podstatně složitější. Uvažujeme-li, že při vzdálenosti elektrod na zapalovací svíčke je 0,35 mm bude potřebné průrazové napětí při tlaku 1 MPa cca 12 kV. Z důvodu velikosti vysokého napětí si můžeme dovolit zvětšovat elektrodovou vzdálenost na zapalovací svíčke, ale s ohledem na systém zapalování, aby byl schopen toto napětí spolehlivě generovat. Proto méně vyspělé zapalovací systémy jako jsou magnetové mají vzdálenost elektrod 0,35 – 0,4 mm, bateriové 0,6 mm, elektronické 0,7- 0,8 mm, plně elektronické 1,0- 1,2 mm a kondenzátorové až 1,5 mm. Toto je zapříčiněno způsobem tvoření vysokého napětí, zda je induktivní, kapacitní nebo na piezoelektrickém jevu. [12]



Obr. 59 - Závislost vysokého napětí na frekvenci zážehu [12]

5.2 Produkce plynu NO_x

V dnešní době je kladen velký důraz na emise a je trendem snižovat produkci závadných plynů jako je plyn NO_x . Vývojové středisko Jenbach změřilo a vytvořilo graf k porovnání produkce NO_x . V grafu je znázorněno porovnání zapalování svíčkou, laserové zapalování a dieselové spalování. Ze sloupcového grafu vidíme, že laserové zapalování několikanásobně snižuje produkci NO_x ve výfukových plynech. [13]



Obr. 60 - Produkce plynu NO_x [13]

6. Odhad a popis trendů vývoje moderních zapalovacích systémů

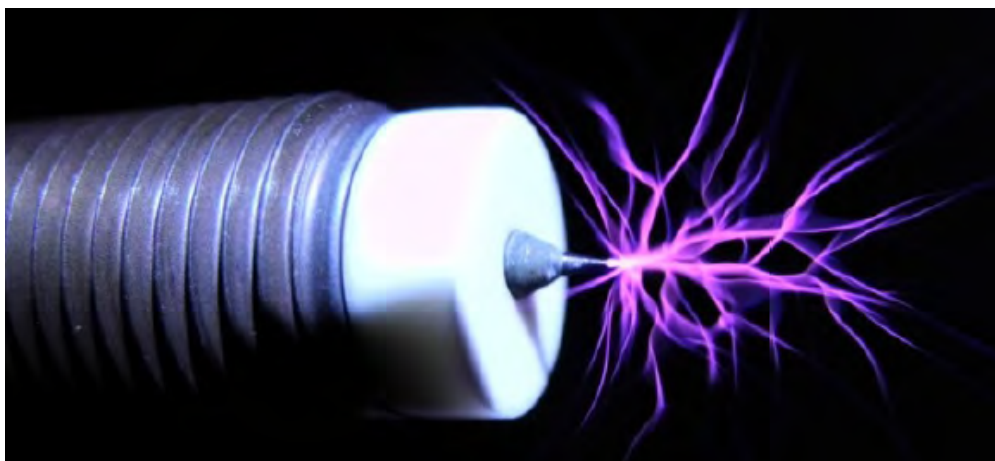
Podle směrnice Evropské unie mají od roku 2020 emise CO_2 z osobních automobilů klesnout na hodnotu průměrně 95 g/km. Aby bylo této hodnoty dosaženo, musí se pokročit i ve vývoji na spalování u benzínových motorů. Je třeba dosáhnout lepšího spalování paliva a recirkulace plynů ve výfukovém systému. Na zapalování jsou kladeny velmi vysoké nároky na spolehlivost, zvýšení efektivnosti a zvýšení rychlosti hoření lepším zapálením směsi. V dnešní době je snaha nejen snižovat emise CO_2 , ale i snížit spotřebu paliva a vyrovnat se dieselovým motorům. Na tyto požadavky má velký vliv nejen zapalování, ale i ostatní části motoru, jako je tvar spalovací komory, vstřikování, přeplňování, atd. [14]

6.1 Koronový výboj

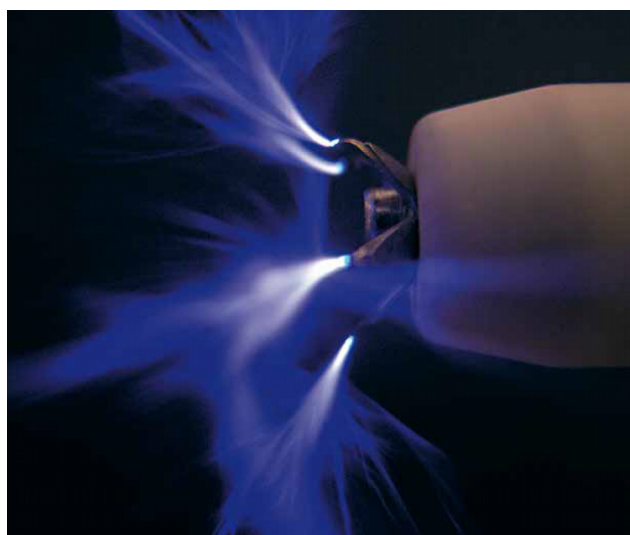
6.1.1 Základní princip koronového výboje

Koronový výboj (viz obr. 61 a 62), též označován jako vysokofrekvenční - HFI (High-frequency ignition), je samostatný výboj vznikající za atmosferického tlaku. Výboj se vytváří v nehomogenním elektrickém poli, které vzniká v okolí elektrody s malým poloměrem křivosti, což jsou dráty, hroty a hrany vodičů s vysokým napětím oproti okolí. Probíhá ionizace a světélkování plynu v tenké vrstvě kolem elektrody a tím vzniká výboj. Koronový výboj je trsovitý výboj, slabý, tichý a prakticky neviditelný. Proud tekoucí plazmy je závislý na vstupním napětí, tvaru elektrody, vzdálenosti elektrody a na druhu plynu mezi elektrodami. Tento systém zapalování, který nejen zaručuje spolehlivější zapálení, ale může také přispět k vyšším rychlostem hoření a tím k efektivnějšímu uvolnění energie tím, že tvoří prostorově distribuované jádro plamene. [14, 15]

Korona vzniká při tzv. počátečním napětí. Je-li napětí nižší než počáteční napětí, vznikne tzv. tichý výboj. Pokud napětí na elektrodách zvýšíme na počáteční, vzniká korona. Při dalším zvyšování napětí roste také proud a zvětšuje se tloušťka svítící vrstvy. Když proud zvyšujeme několikanásobně než je počáteční napětí, rozšíří se světélkující vrstva až ke druhé elektrodě a z původního koronového výboje vznikne jiskra nebo oblouk. [14]



Obr. 61 - Koronový výboj z hrotu [14]

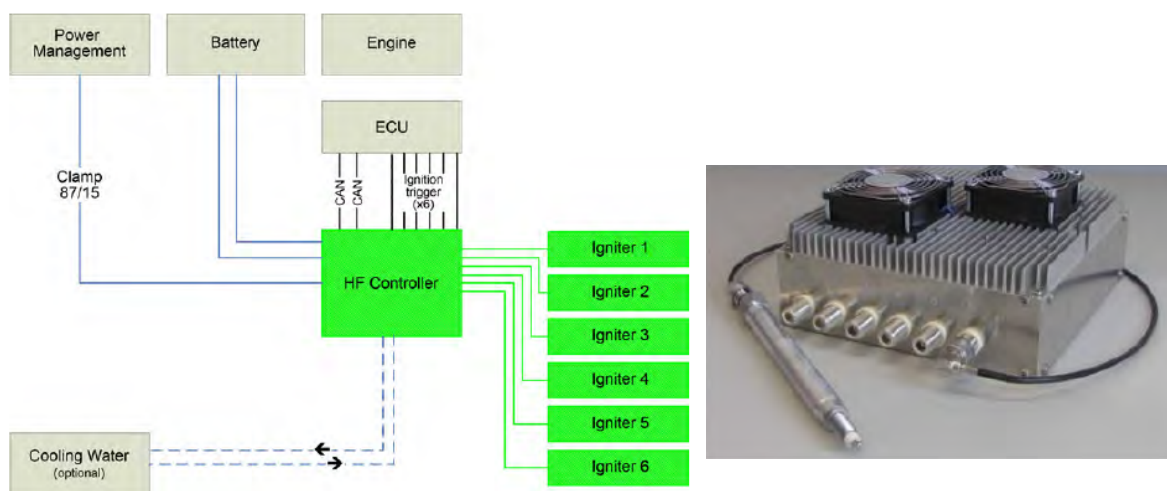


Obr. 62 - Koronový výboj ze čtyř hrotů [15]

Zapalování na principu koronového výboje má potenciál být k dispozici na trhu v časovém předstihu před zavedením směrnice CO₂, která vstoupí v platnost v roce 2020.

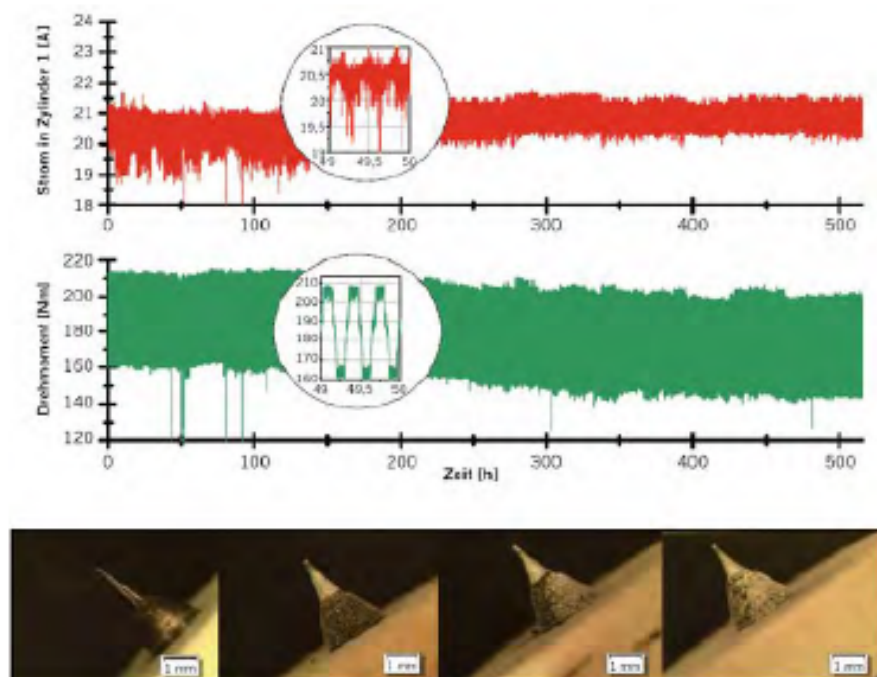
Vyvíjením koronového zapalování se v současné době zabývá hodně firem, např. firma BorgWarner Beru. Tento systém nese označení jako EcoFlash, míří k sériové výrobě a tento systém má společné to, že vysoké napětí potřebné pro výboj v plynu je generováno pomocí transformace rezonance z rezonančního obvodu. Zde je nezbytné omezení napětí (v závislosti na pracovním bodu motoru) takovým způsobem, aby nemohl nastat nežádoucí přeskok. Tento úkol je ideálně řešen pomocí dimenzování spalovací komory ze simulace. [14]

Zapalování EcoFlash použitý v osobních automobilech se skládá z vysokofrekvenčního regulátoru (HF Controller) a tří až šesti zapalovacích svíček v závislosti na počtu válců motoru (viz obr. 63). Vysokonapěťové kabely mezi regulátorem a zapalovací svíčkou jsou tvořeny koaxiálním kabelem. Jako poslední fáze transformace napětí se provádí rezonančním obvodem integrovaným v zapalovacích svíčkách. Napětí, které je zde přivedeno je omezeno na méně než 1 kV. Maximální efektivní příkon prototypu EcoFlash je 350 W pro šestiválcový motor. Pro tento motor má EcoFlash zapalovací energii cca 90 mJ. Pro čtyřválcový motor 2,0 l s přímým vstřikováním paliva byla přiměřená zapalovací energie 50 mJ. Zapalovací energie menší než 25 mJ je dostatečná pro dvoudobé motory o zdvihovém objemu 92 cm³. [14]



Obr.63 - Schéma zapojení EcoFlash zapalování firmy BorgWarner Beru [14]

EcoFlash zapalování umožňuje snížení spotřeby při plném zatížení následkem rychlejšího zapalování a zvýšení točivého momentu při nízkých otáčkách motoru, což bylo prokázáno v testech. Byly provedeny vytrvalostní zkoušky EcoFlash zapalování na přeplňovaném motoru 1,4 l s vysokým zatížením. Zkouška trvala déle než 500 hodin. Byly zkoumané významné provozní parametry vysokofrekvenčního zapalování, jako je příkon a střední frekvence zapalovací svíčky v závislosti na čase. Vytrvalostní zkouška byla přerušována v pravidelných intervalech a bylo dokumentováno opotřebení na zapalovacích elektrodách. Zkoumané parametry systému nevykazovaly žádné významné změny v průběhu provozní doby (viz obr. 64). Opotřebení elektrody bylo též velmi nízké, což umožňuje očekávat delší životnost na vozidlovém motoru cca 100 000 km (lepší zapalovací svíčky se pohybují kolem 60 000 km). [14]



Obr. 64 - Závislosti primárního proudu na čase, točivého momentu motoru na čase a opotřebení elektrody [14]

Na obr. 64 můžeme vidět závislost primárního proudu na čase, kdy proud na začátku zkoušky výrazně kolísá a po 300 hodinách se sice mírně zvýšil, ale zato ustálil. U druhé závislosti točivého momentu na čase bylo vidět, že nepatrně klesá. Tyto závislosti byly provedeny v rozsahu otáček motoru mezi 2000 až 5500 ot./min. Opotřebení elektrody zapalovací svíčky bylo kontrolováno po 0, 150, 320 a 480 hodinách a všechny zapalovací svíčky měly jen nepatrné opotřebení a i na konci zkoušky byly plně funkční. [14]

Lze předpokládat, že vysokofrekvenční nebo-li koronovo zapalování bude mít v budoucnosti své využití nejspíše i v sériové výrobě.

6.2 Moderní svíčky Beru

V postupném vývoji zapalování také patří vylepšení zapalovacích svíček. Zapalovací svíčky se používají od roku 1902 (vynalezeny firmou Bosch) a od té doby se stále zdokonalují. Vývojem zapalovacích svíček se zabývá hodně společností, jako například Beru. O inovacích v zapalovacích svíčkách Beru si ještě povíme více. Od zapalovacích svíček očekáváme, aby byl motor plynulý, rychlý a úsporný. Proto musí

svíčky splňovat ty nejprísnejší požadavky na funkčnost, např. musí generovat jiskru zhruba 500 – 3500krát za minutu (pro čtyřválcový motor), musí být zajištěno zapálení i v teplotách okolo -20 °C. [16]

Moderní zapalovací svíčka musí splňovat následující požadavky:

- spolehlivý přenos vysokého napětí i při napětí okolo 40 kV
- dobrou izolační schopnost i při teplotách okolo 1000°C
- odolnost vůči teplotním rázům
- činnou část izolátoru s dobrou tepelnou vodivostí včetně elektrod
- tlakové a vzduchové utěsnění spalovací komory
- vysokou mechanickou pevnost pro spolehlivou montáž
- odolnost vůči opálení kontaktů
- prevenci tvorby usazenin na izolátoru

Zapalovací svíčky Beru jsou konstruovány z nejlepších materiálů, aby dlouhodobě vyhovovaly těmto extrémním požadavkům. Beru nabízí velký výběr materiálů na zapalovací svíčky, aby vždy dokázaly nabídnout optimální svíčku pro daný typ motoru. Pro centrální elektrody se používají speciální slitiny na bázi niklu a s měděným jádrem mají dobrou tepelnou vodivost. Stříbrné elektrody mají ještě vyšší tepelnou vodivost. Platinové a iridiové elektrody vykazují nejlepší odolnost vůči opálení a tím prodlužují servisní interval mezi výměnami. Důležité je i konstrukční řešení uzemňovací elektrody. Od její geometrie se odvíjí přístupnost směsi, opotřebení, odvod tepla a požadavek na zapalovací napětí. [16]

Funkce zapalovací svíčky ve spalovací komoře u svíček s klouzavou jiskrou je ovlivněna třemi faktory :

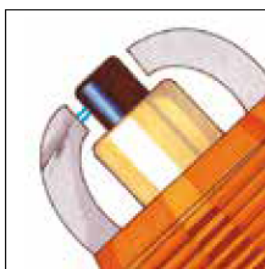
- polohou jiskry
- přeskokem jiskry
- vzdáleností elektrod

Ve vztahu k zapalovací vzdálenosti jsou různé dráhy (viz obr. 65) :

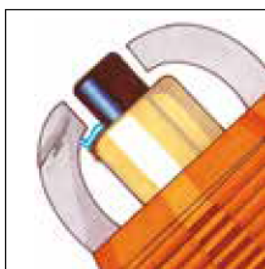
- dráha, kterou se pohybuje vzdušná jiskra mezi středovou a uzemňovací elektrodou, aby zapálila směs paliva se vzduchem ve spalovací komoře
- dráha, kterou protéká kluzná jiskra tím způsobem, že nejprve klouže po povrchu činné části izolátoru a následně přeskočí na uzemňovací elektrodu. Absolvováním této dráhy jiskra spaluje škodlivé usazeniny a zbytky po spalování [16]

- dráha vzdušné, kluzné jiskry - to jsou přeskoky, které se mohou uskutečnit přes vzduch a izolátor. Zkombinováním vzájemně nezávislých drah vzdušných a kluzných jisker lze omezit opal elektrod a tím zapalovací svíčky vydrží výrazně déle [16]

Přeskok vzdušné jiskry

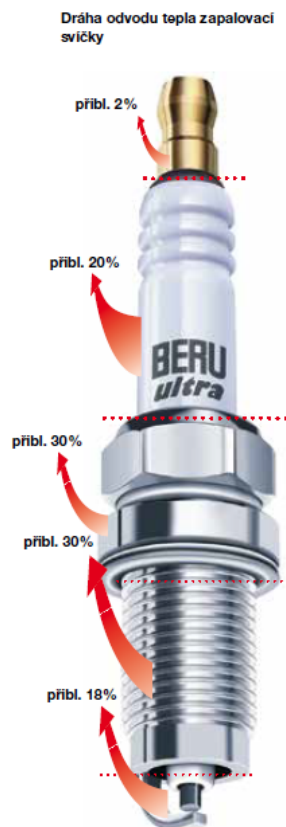


Přeskok kluzné jiskry



Obr. 65 - Vzdušná jiskra a kluzná jiskra [16]

Zapalovací svíčka musí co nejlépe odvádět teplo. U spalovacího procesu ve válci dochází k nárůstu teploty až na 3000°C a při této teplotě dochází k ohřevu zapalovací svíčky. Zapalovací svíčka je schopná odvést až 80% absorbovaného tepla (viz obr. 66). Převážná většina tohoto tepla se přenáší závitem svíčky přímo do hlavy válce. Zapalovací svíčky je tedy nutné vždy utáhnout na správný utahovací moment. Pouze 20% tepla odebírá a odvádí směs paliva a vzduchu, které proudí kolem svíčky. Využitím kompozitních elektrod, např. niklových s měděným jádrem lze dosáhnout účinnějšího vedení tepla. [16]



Obr. 66 - Odvedení tepla svíčkou [16]

Beru vyrábí svíčky pro extrémně náročné požadavky. Zapalovací svíčka **Beru Ultra x Titan** (viz obr. 67) slouží k tvorbě vysokoenergetických jisker při vysokých tlacích ve spalovací komoře, při které dochází k velmi účinnému spalování. Zapalovací svíčka má důmyslně konstruované uzemňovací elektrody ze slitin niklu a titanu, které jsou odolné vůči opalu. Tím je zajištěno spolehlivější zapalování a vysoce efektivní spalování s nízkými emisemi. [16]



Obr. 67 - Zapalovací svíčka Beru Ultra x Titan [16]

Další typy zapalovacích svíček pro automobilový průmysl, které odolávají náročnějším podmínkám jsou svíčky **Beru Ultra** a **Beru Bi-Hex** (obr. 68). Tyto zapalovací svíčky jsou šetrné k životnímu prostředí, šetří palivo a chrání katalyzátor ve výfukovém potrubí. Jsou spolehlivé i při nízkých teplotách, mají dlouhou životnost,

dobrou odolnost, dvousložkové materiály (středová elektroda s niklovým opláštěním měděného jádra), lepší montážní parametry (montážní klíč velikosti 14, menší průměr závitu, délka závitu 26,5 mm) a spolehlivé zapalování díky koronovému výboji. [16]



Obr. 68 - Zapalovací svíčky Beru Ultra a Beru Bi-Hex [16]

Beru také vyrábí speciální svíčky pro motorové pily, sekačky, plně stíněné svíčky pro služební vozy, svíčky pro provoz na zemní plyn a stacionární motory. Také se vyskytují zapalovací svíčky pro testovací účely a zkoušky motorů. [16]

Budoucnost zapalovacích svíček Beru

Technologické trendy ve vývoji zážehových motorů se ubírají směrem k modifikování procesů spalování a zmenšování rozměrů. V současné době je kladen největší důraz na snižování spotřeby paliva, snižování emisí a větší požitek z jízdy. Tyto parametry budou nejspíše směrodatné i v budoucnu. V dnešní době se u motorů vyskytuje proměnlivé časování ventilů a přímé vstřikování paliva. Nejnovější generace vstřikovacích ventilů s piezoelektrickým ovládáním rozšiřují provozní rozsah motoru na chudé směsi (stechiometrický poměr λ větší než 1), čímž by se mělo dosáhnout úspory paliva a snížení emisí. To zvyšuje nároky na zapalovací svíčku - menší rozměry, specifická poloha uzemňovací elektrody, přesnější poloha jisker, dielektrická a mechanická pevnost keramiky zapalovací svíčky. [16]

Automobilky současně požadují zvýšení životnosti zapalovacích svíček na 60 000 – 120 000 km. Tím vzrostl požadavek na elektrický potenciál, který je nutný dodržovat kvůli snížení opotřebení jiskřiště na co nejnížší hodnotu. Vývoj nových uspořádání elektrod, nových materiálů a procesů jde stále kupředu. U svíček s elektrodami na bázi slitiny niklu dochází k opotřebení převážně prostřednictvím oxidace. [16]

Beru vyvinula nový vysokonapěťový konektor, který díky delší izolační části o 8,5 mm poskytuje větší izolační plochu a tím pádem zvyšuje odolnost vůči výbojům až do 9 000 V. Tento nový konektor snižuje riziko přeskočení vysokonapěťových jisker na

svíčky, které díky zmenšování rozměrů a těsnějšímu uspořádání mohou nastat. Konektor (viz obr. 69) má vnitřní vodivé spojení, které je uskutečněno pružinou (většina konektorů má vodivé spojení vnější) a je provedena tak, aby byl středový kontakt bezpečně obklopen vydutím dříku zapalovací svíčky. I přes vyšší výkon zapalovací soustavy dojde k citelnému zlepšení odolnosti vůči výbojům. [16]



Obr. 69 - Konektor Beru [16]

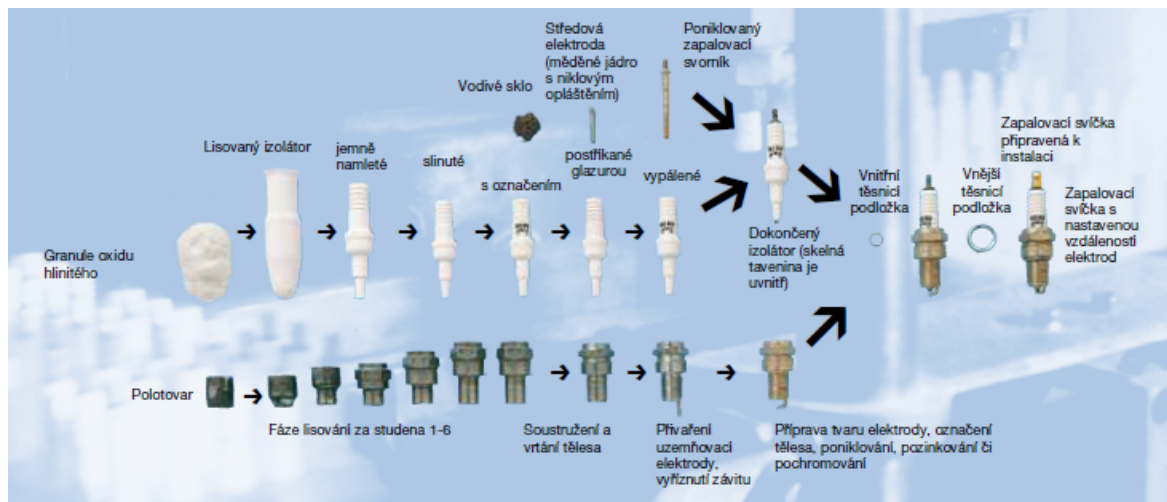
V budoucnu má Beru patent na vysokofrekvenční technologii zapalování generující vysokoenergetické elektrostatické pole (viz obr. 70) uvnitř spalovací komory. Tím se značně zlepší účinnost a rychlost spalování. Toto konstrukční řešení dokáže spolehlivě zapálit i extrémně chudé směsi paliva a vzduchu. Systém dále přináší elektronickou regulaci různých parametrů spalovacího cyklu, což vede k dalšímu snížení emisí, zlepšení účinnosti a zvýšení výkonu motoru. Společnost Beru věří, že vysokofrekvenční zapalování má šanci se prosadit a plánuje spuštění sériové výroby v horizontu několika let. Na obrázku je vidět vysokofrekvenční výboj na hrotu zapalovací svíčky. [16]



Společnost BERU hodlá se svou novou vysokofrekvenční technologií zapalování způsobit revoluci v oblasti zážehových motorů.

Obr. 70 - Vysokofrekvenční výboj Beru [16]

Beru vyrábí zapalovací svíčky na počítačem řízených výrobních linkách. Výroba probíhá od přípravy keramických materiálů pro výrobu izolátoru z vysoce kvalitního oxidu hlinitého až po instalaci vnějšího těsnění. Na obr. 71 je vidět postupná počítačově řízená výroba zapalovací svíčky.



Obr. 71 - Postup výroby zapalovacích svíček Beru [16]

Zapalovací svíčky musí spolehlivě fungovat a to i v nejnáročnějších podmínkách motoru. Aby bylo zajištěno, že zapalovací svíčky splňují tyto vysoké požadavky, podléhají během vývoje a výroby celé řadě přísných testů. [16]

6.3 Laserové zapalování

Laserové zapalování není tak zcela nové. Jeho první popis pochází z roku 1978, ale jeho použití zatím nebylo úspěšné, proto bylo omezeno jen na výzkumné činnosti v laboratoři. Lasery, které by dokázaly spolehlivě fungovat ve spalovacím motoru, ať už stabilním nebo ve vozidlovém, by byly příliš velké a drahé. A tak se zatím toto zapalování neujalo a zůstává klasické indukční. Ve srovnání s běžnou zapalovací svíčkou, která zapálí směs vzduchu a paliva mezi elektrodami svíčky a poté se plamen šíří postupně do celého spalovacího prostoru. Laserové zapalování si dokáže vytvořit a přesně zaměřit paprsek nebo více paprsků do středu komory mezi hlavou motoru a pístem. Na obr. 72 je vidět porovnání provedení tříjiskrové zapalovací svíčky a laserové zapalovací svíčky se třemi paprsky. [17]



Obr. 72 - Porovnání klasické indukční svíčky s laserovou svíčkou [17]

Laserové zapalování je rychlejší a přesnější, to má za následek snížení spotřeby paliva a snížení emisí, zejména NO_x . Pro zapálení laseru by generující plazma měla dosáhnout intenzity 1000 W/cm^2 . Tato vysoká intenzita může být realizována pomocí Q-spínaného laseru emitujícího na typicky nanosekundové trvání a megawattové výkonové pulzy. Jak bylo řečeno energie se přenáší v nanosekundovém časovém horizontu laserového zapálení, zatímco v zážehovém motoru s induktivním zapalováním se odehrává v časovém měřítku mikrosekund. Z tohoto důvodu v důsledku zvýšené teploty tlaku a vysoké rychlosti přenosu energie začíná spalování relativně dříve v laserovém zapalování ve srovnání s jiskrovým zapalováním. Laserové zapalování přináší i jiné výhody jako je schopnost zapálit chudší směs než jiskra svíčky. Spalování je stabilnější v nižších otáčkách motoru. Volnoběžné otáčky motoru mohou být sníženy a odpadají servisní kontroly svíčky. [17]

Základní princip laserového zapalování

V současných průmyslových aplikacích se používá těchto hlavních typů pevnolátkových laserů, které jsou uvedeny níže v tabulce. Každý typ má svoje výhody, nevýhody a typické aplikace, pro které je vhodný. Rozdělení laserů je uvedeno v tabulce 2.

Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
Pevnolátkové				
Rubínový laser	Rubín	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG laser	Neodym, YAG	1064 nm	IR	chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Er:YAG laser	Erbium, YAG	2,94 μ m	IR	chirurgie, stomatologie
Titan-safírový laser	Titan, Safír	690 - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie

Tab. 2 Typy pevnolátkových laserů

Laser je kvantový generátor a zesilovač koherentního záření, které vzniká, když všechny fotony mají stejnou barvu (vlnovou délku, frekvenci a nízkou rozbíhavost svazku). Laserové světlo vzniká v prostředí stimulujícího záření potlačením spontánní emise na úkor vynucení emise záření. Spontánní emise záření vzniká, když atomy s energetickou hladinou E2 mají tendenci zaujmout energetickou hladinu s nižší energií E1 a při tom emitují kvantum záření s frekvencí ν , která se určí z rovnice :

$$E_2 - E_1 = h \cdot \nu$$

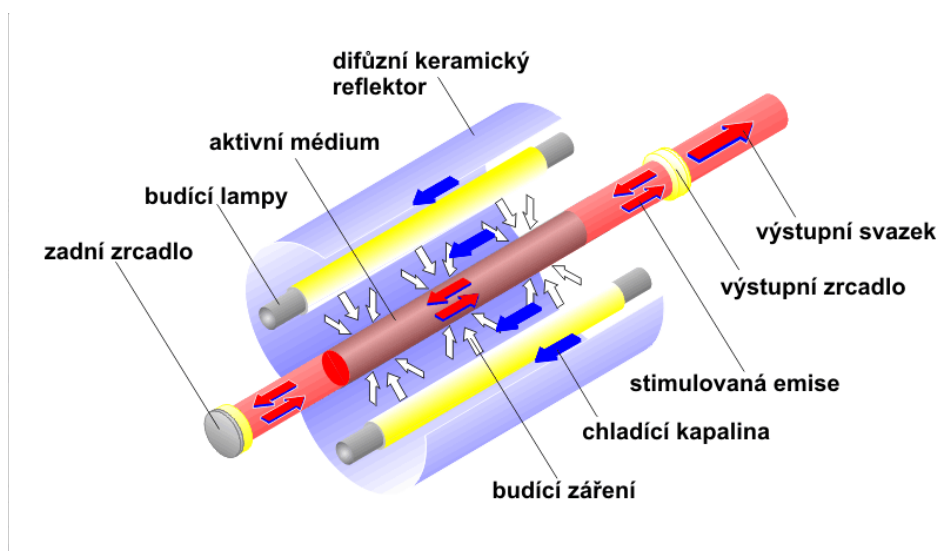
- h je Planckova konstanta.

Vlivem vnějších příčin se vybuzený atom vrací zpět do základního stavu, přičemž emituje nový foton se stejnou frekvencí jako měl předcházející foton (stimulovaná emise). Stimulovaná emise je základ pro vznik laserového světla. Je zapotřebí, aby se nejprve co nejvíce elektronů udrželo na vyšší energetické hladině a posléze na této hladině vydrželo co nejdelší čas. To znamená, že atom musíme vybudit a dosáhnout tak populační inverze. Tím je vyšší energetická hladina obsazena více elektrony než hladina nižší. Látky, díky kterým se takto děje, se nazývají výbojky nebo aktivní prostředí. [18, 19]

Pro použití zapálení směsi v pístových spalovacích motorech se nejvíce hodí **Nd: YAG laser**. Je sice historicky nejstarší, ale lze je budit buď výbojkami nebo laserovými diodami.

Nd: YAG laser

Je nejpoužívanější pevnolátkový laser. Aktivním prostředím je neodym, dopovaný Yttrium-Alumin Granát $Y_3Al_5O_{12}$. Tyto lasery mají nízkou účinnost přeměny elektrické energie na světelnou, neboť velká část energie výbojky se nevyužije a je přeměněna na teplo, proto je nutné laser chladit. DPSS Nd:YAG lasery mají vyšší účinnost a lepší kvalitu svazku. Schéma Nd:YAG laseru je vidět na obr. 73. [18]



Obr. 73 - Schéma Nd:YAG laseru [18]

DPSS Nd:YAG lasery mají dva typy buzení dle uspořádání rezonátoru - boční (transversální) buzení a zadní buzení (tzv. *End-pumped*). U zadního buzení se vede budicí záření z laserových diod do YAG krystalu optickým vláknem, diody tak mohou být externě mimo rezonátor, což je výhodné. Pokud porovnáme boční a zadní buzení, pak u zadního buzení dosáhneme lepší kvality svazku, ale nižších výkonů. U bočního buzení lze naopak dosáhnout vyšších výkonů, ale kvalita svazku je nižší. DPSS Nd:YAG laser se používá hlavně v tzv. Q-spínaném pulsním režimu, kdy laser generuje velmi krátké pulsy v řádech nanosekund a průměrný výkon se pohybuje do 100W. Hlavní použití je pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. V porovnání s LPSS lasery je zde vyšší účinnost, delší životnost a menší nároky na chlazení. Používání těchto laserů již několik let silně klesá a jsou nahrazovány vláknovými pulsními lasery, které nabízejí v podstatě pouze výhody. V dnešní době zaznamenávají tyto lasery prudký rozvoj především díky nahrazení výbojky laserovou diodou. Výhodou těchto laserů je větší účinnost, delší trvanlivost diod oproti výbojkám, menší spotřeba elektrické energie a menší provozní náklady. [17, 18]

Q-spínání

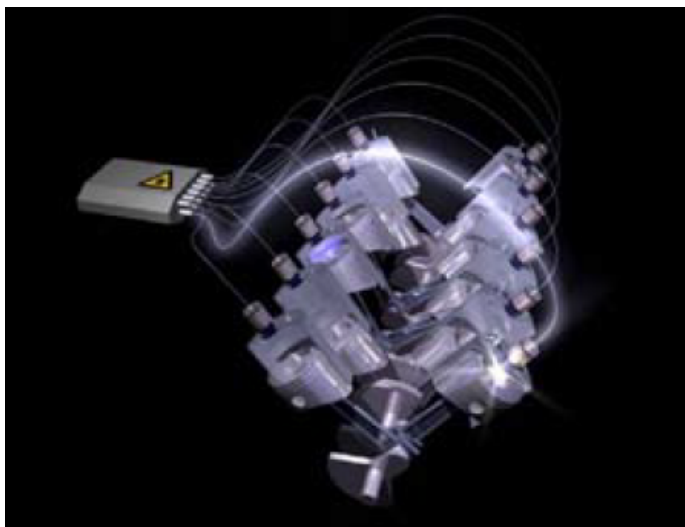
V režimu volné generace paprsků zůstávají ztráty v rezonátoru po dobu buzení prakticky stejné. Generace začíná na nízké úrovni inverze populace a probíhá nepravidelně. Délka výstupního impulsu je vysoká (μs , ms) a špičkový výkon nízký. V režimu generace s modulací jakosti rezonátoru, nebo-li v tzv. režimu Q-spínání, je možno docílit generace velmi krátkých impulsů (ns) s vysokým špičkovým výkonem výstupního záření. V procesu buzení aktivního prostředí jsou ztráty v rezonátoru nastaveny tak vysoko, aby podmínky pro generaci nenastaly až do okamžiku, kdy inverze populace v důsledku buzení dosáhne maximálních hodnot. V tom okamžiku jsou ztráty rychle sníženy a generace laserového záření začíná s vysokým součinitelem zesílení. Inverze populace je velice rychle vyčerpaná, přičemž vzniká časově krátký a tím velmi výkonný výstupní impuls záření. V technice Q-spínání se nejčastěji používají tři typy uzávěrek zajišťujících výše popsanou modulaci jakosti rezonátoru:

- *opticko – mechanická uzávěrka*: rotující zrcadlo rezonátoru, které snižuje ztráty v rezonátoru v okamžiku, kdy prochází polohou kolmou k optické ose
- *elektro – optická uzávěrka*: využívá možnosti řídit napětím polarizaci (lineární nebo kruhovou) nebo její směr v konkrétním krystalu umístěném v rezonátoru
- *pasivní modulace jakosti rezonátoru*: využívá nelineární transmise některých krystalů nebo barviv majících absorpční pásmo na vlnové délce laserového přechodu.

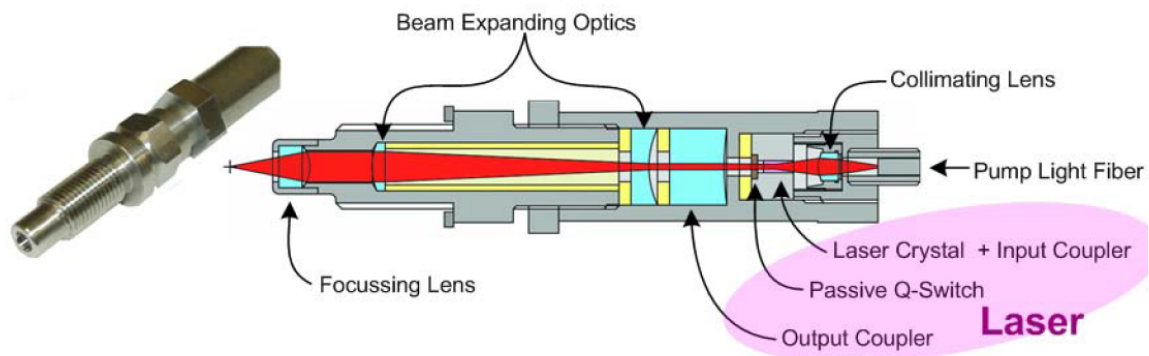
Na začátku impulsu buzení je barvivo prakticky nepropustné, protože počet jeho center absorbujících stimulované záření je velký. Při zvyšování buzení roste počet center barviv přecházejících na vyšší hladiny a to až do okamžiku, kdy počet center schopných absorbovat rychle klesá, barvivo se stává transparentním a jakost rezonátoru tak narůstá. [20]

Účinnost laserového zapalování je větší hlavně proto, že místo zapálení směsi může být vybráno pružněji než u zapalovací svíčky. Dovoluje zážeh daleko od chladné stěny válců. Je eliminován nevhodný stínící a teplotu snižující účinek izolátoru zapalovací svíčky. Následkem tohoto faktu jádro plamene expanduje značně rychleji. Zkrácení doby hoření paliva lze dosáhnout vytvořením více bodů zapálení. Toho lze dosáhnout použitím separátních laserových paprsků zaměřených do vhodně rozložených bodů uvnitř směsi. Na konci laserového zapalovacího modulu je safírové okno, které je určeno k tomu, aby chránilo laser uvnitř válce před vysokými teplotami a tlaky. Navíc samočistící, tudíž prahová energie zážehu je udržovaná na konstantní výši a s dobou

provozu neklesá. Aby byly sníženy náklady a mohl se použít relativně velký a silný laser, bylo by výhodné použít multiplexní systém, který z jediného laseru vysílá pulsy každému válci pomocí optických vláken (viz obr. 74). Ale optická vlákna jsou rychleji opotřebovaná, tedy rychle poškozená. Spolehlivější systém zapalování pomocí laseru bude muset využívat mikrolaserové moduly na každý jednotlivý válec, tzv. laserová zapalovací svíčka (viz obr. 75). [17]

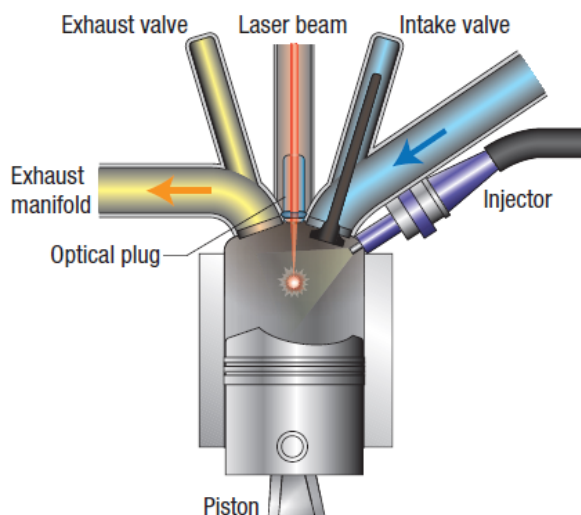


Obr. 74 – Použití multiplexního systému vedení laseru optickými vlákny [13]



Obr. 75 - Laserová zapalovací svíčka Jenbach [13]

Laserová zapalovací svíčka má přibližně stejnou velikost jako zapalovací svíčka klasická a je i shodně umístěna v hlavě motoru. Laserový paprsek je vyslán kolmo k pístu a vstřikovací tryska vysílá paprsek benzínu přímo na laserový paprsek. Toto lze vidět na obr. 76.



Obr. 76 – Vlevo jsou k porovnání zapalovací svíčky a vpravo je uspořádání laserové zapalovací svíčky [21]

Ve spalovacím prostoru jsou vysoké tlaky a teploty (u atmosferického benzínového motoru cca 12 bar). Z tohoto důvodu musí být čočka laseru nebo optického kabelu chráněná safírovým okénkem. Ale toto okénko nemá dlouhou životnost. Další nevýhoda je, že okénko musí být čisté, čehož v běžném vozidlovém nebo stabilním motoru nikdy nelze docílit. Usazeniny se tvoří ze zbytků spalín a také utěsnění pístu ve válci není a nemůže být úplně ideální.

Dr. Geooff ze School of Engineering, Liverpool University, který spolupracuje s Ford Motor Company, uvedl tuto myšlenku na téma lasery v zapalovacím systému motorů: „Pro koncept, který má být životaschopný, ať už s optickým oknem, či nějakým rozhraním v prostoru vstupu do válce, je třeba dokázat odolnost materiálu za skutečných provozních podmínek motoru a stálost parametrů laserového zapalování. Také životaschopnost použití vícenásobných nízkých energetických pulzů k zapálení a řízení hoření paliva je nutné ještě testovat. Náš názor je, že zbývá spousta věcí k probádání než bude možné zavést laserové zapalování do běžného provozu v automobilech se spalovacími motory.,[17]

Problém se stálostí materiálu za těchto těžkých podmínek by vyřešilo diamantové okénko, ale to by bylo velmi drahé a náročné na výrobu. I přes to stále zůstává problém s čistotou okénka, který nebyl doposud vyřešen. Další úskalí laserového zapalování bude jeho velmi vysoká pořizovací cena.

7. Závěr

V této bakalářské práci byly shrnuty všechny doposud používané zapalovací systémy. V dnešní době se již většina nepoužívá a všechny motory, které se v přítomnosti vyrábějí mají plně elektronické zapalování. Celé zapalování je řízené řídicí jednotkou motoru, která bere v potaz aktuální stav motoru a okolní prostředí, aby motor pracoval co nejlépe a nejspolehlivěji. U tohoto zapalování odpadají všechny pohybující se mechanické části. Z tohoto důvodu je toto zapalování spolehlivé a téměř bezúdržbové.

V budoucnosti se bude řešit zapalování pomocí koronového výboje, které podle mého názoru má slibnou budoucnost. Další zapalovací systém budoucnosti je laserové zapalování, které se již vyvíjí dlouhou dobu a nemá v blízké budoucnosti spolehlivé uplatnění. Laserové zapalování by bylo velmi drahé a nespolehlivé z důvodu udržování čistoty okénka, které odděluje laserovou čočku od spalovacího prostoru motoru. Okénko vyrobené ze safíru nemá dlouhou životnost a usazují se na něm nečistoty. Dle mého názoru laserové zapalování ještě čeká další výzkum. Přikláním se k výroku Dr. Geooffa, že je třeba najít materiál, který bude spolehlivý a nebude držet nečistoty. Velká budoucnost patří nanomateriálům. A tak by mohl být vyvinutý nějaký odolný materiál, který by splňoval tyto náročné požadavky. Poté by laserovému zapalování k reálnému použití nic nebránilo.

8. Použitá literatura

Řazení dle pořadí použití:

- [1] Remek Branko. Automobil a spalovací motor, historický vývoj. Vydala Grada Publishing, a.s. U průhonu 22, Praha, 2012, ISBN 978-80-247-3538-2
- [2] Jan Zdeněk, Ždárský Bronislav a Kubát Jindřich. Automobily. 1.vydání Brno: Avid, 2008, ISBN 978-80-87143-14-8
- [3] Schnabl Jan, Analýza systémů zapalování a vstřikování paliva. Brno: VUT Brno 2011. Bakalářská práce. VUT Brno, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky.
Dostupné z https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=39140
- [4] Krejčí František, Elektrotechnika I. Pro 2. ročník UO automechanik, Vydalo Informatorium, spol.s r. o., Praha 2006, ISBN 80-7333-049-0
- [5] Zapalování teorie, Technická univerzita Ostrava
Dostupné z <http://fei1.vsb.cz/kat430/data/ae/Zapalovani.pdf>
- [6] Rolf Gscheindle a kolektiv z německého originálu, Příručka pro automechanika. Praha: Sobotáles, 2001, ISBN 80-85920-76-x
- [7] Jaroslav Andrt, Dílenská příručka osobních automobilů Škoda 105, 120, 130, garde, rapid. Automobilové závody, národní podnik, Mladá Boleslav, vydání V. - 1987
- [8] John B.L.Heywood, Internal combustion engine fundamentals, 1988 by McGraw-Hill, Printed in the United States of America.
- [9] Lukáš Pastorek, Využití energie piezoelektrického jevu, Západočeská univerzita v Plzni 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechniky.
Dostupné z <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/2274/Piezoelektricky%20dej.pdf?sequence=1>
- [10] Zdeněk Vala, Zapalování účel, základní rozdělení, Národní ústav pro vzdělávání, školské a poradenské zařízení a zařízení pro další vzdělávání pedagogických pracovníků, 1987. Dostupné z http://www.sossoukyjov.cz/data/File/VY_32_INOVACE_6b03.pdf
- [11] Robert Bosch, Řízení zážehového motoru – zapalování Bosch, Postfach, Stuttgart. 1. české vydání 1999, vydala Robert Bosch odbytová spol. s.r.o. Praha 4 . Dostupné z <http://uloz.to/x52B4vs/bosch-zapalovani-pdf>
- [12] Beroun Stanislav, Cerha Josef, Příslušenství pohonných jednotek, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci 1989, ISBN 80-7083-003-4

- [13] Winter E., Laser plasma Jenbach – initiated ignition of engines, Phonics institute Vienna University of Technology Vienna, Austria 2007
- [14] BorgWarner, High-frequency ignition systém based on Corona discharge, emissions.borgwarner.com
- [15] BorgWarner, BorgWarner ignition coil technology emissions.borgwarner.com
- [16] Beru, Vše o zapalovacích svíčkách, Federal-mogul motorparts, Global aftermarket EMEA Kontich, Belgium
- [17] Krajčovič Zdeněk, Laserové paprsky převálcují zapalovací svíčky, Automotive design 2011
- [18] Kořán Pavel, Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu, Lao lasery a optika, 2013. Dostupné z <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [19] Kolkop David, Technologie řezání laserem, Diplomová práce, Fakulta strojního inženýrství, ústav strojírenské technologie, Vysoké učení technické v Brně 2010
- [20] Horný Vojtěch, Pevnolátkový Nd:YAG laser v režimu volné generace a v režimu Q-spínání, zesilování laserového záření a generace druhé harmonické, ČVUT Praha 2013/2014 Dostupné z <http://people.fjfi.cvut.cz/blazejos/public/ul1.pdf>
- [21] Graham Duncan, Lasers for engine ignition, Macmillan publishers limited 2008 Dostupné z www.nature.com/naturephotonics

Seznam obrázků

Obr. 1 Kočár s motorem Daimler.....	14
Obr. 2 Vůz Marcusův s benzínovým motorem.....	14
Obr. 3 Závislost přeskokového napětí na tlaku a vzdálenosti elektrod.....	16
Obr. 4 Průběh napětí na elektrodách zapalovací svíčky.....	17
Obr. 5 Vliv předstihu na tlakový diagram motoru.....	18
Obr. 6 Regulační křivka předstihu z momentových charakteristik motoru.....	19
Obr. 7 Řez zapalovací svíčkou.....	20
Obr. 8 Provedení svíček s různými tepelnými hodnotami.....	21
Obr. 9 Provedení izolátoru pro různé tepelné hodnoty.....	22
Obr. 10 Princip magnetového zapalování.....	24
Obr. 11 Měření odtrhu.....	25
Obr. 12 Setrvačnickové magneto.....	27
Obr. 13 Setrvačnickové magneto s kondenzátorovým zapalováním.....	27
Obr. 14 Schéma bateriového zapalování Bosch.....	28
Obr. 15 Řez zapalovací cívkou Bosch	30
Obr. 16 Průběh primárního proudu při době větší než 3τ	31
Obr. 17 Průběh primárního proudu při době sepnutí menší než 3τ	32
Obr. 18 Průběh napětí a proudu mezi dvěma sepnutími kontaktů na čase.....	32
Obr. 19 Řez rozdělovačem.....	33
Obr. 20 Přerušovač.....	34
Obr. 21 Úhel sepnutí kontaktů přerušovače.....	35
Obr. 22 Řez vlastním rozdělovačem.....	36
Obr. 23 Indikátorový diagram.....	37
Obr. 24 Odstředivý regulátor.....	38
Obr. 25 Charakteristika odstředivého regulátoru Škoda 120.....	38
Obr. 26 Podtlakový regulátor.....	39
Obr. 27 Charakteristika podtlakového regulátoru Škoda 120.....	40
Obr. 28 Porovnání klasického a polovodičového zapalování	40
Obr. 29 Základní schéma tranzistorového zapalování.....	41
Obr. 30 Tranzistorové zapalování s odlehčenými kontakty.....	42
Obr. 31 Hallův snímač s pravoúhlým signálem.....	43
Obr. 32 Zapojení zapalování s Hallovým snímačem.....	44

Obr. 33 Indukční snímače.....	45
Obr. 34 Zapojení zapalování s indukčním snímačem.....	45
Obr. 35 Elektromagnetický snímač s oscilátorem.....	46
Obr. 36 Optoelektrický snímač.....	47
Obr. 37 Uspořádání piezoelektrického generátoru a napěťová charakteristika.....	48
Obr. 38 Vysokonapěťový spínač.....	49
Obr. 39 Schéma elektronického zapalování.....	50
Obr. 40 Datové pole úhlu předstihu.....	51
Obr. 41 Indukční snímač.....	52
Obr. 42 Hallův snímač.....	52
Obr. 43 Potenciometr škrťací klapky.....	53
Obr. 44 Blokové schéma zpracování signálů v řídicí jednotce.....	54
Obr. 45 Pole charakteristik úhlu sepnutí.....	55
Obr. 46 Kondenzátorové zapalování s mechanickým přerušovačem.....	56
Obr. 47 Kondenzátorové zapalování s bezkontaktním snímačem impulsů.....	57
Obr. 48 Zapalovací cívka systému SDI.....	58
Obr. 49 Schéma plně elektronického zapalování.....	59
Obr. 50 Hallův snímač pro rozpoznání válce.....	60
Obr. 51 Schéma jednojiskrové zapalovací cívky.....	60
Obr. 52 Jednojiskrová zapalovací cívka.....	60
Obr. 53 Pořadí zapalování u motorů s různým počtem válců.....	61
Obr. 54 Zapojení obvodu s jednojiskrovou zapalovací cívkou.....	62
Obr. 55 Dvoujiskrová zapalovací cívka Bosch a Weber.....	62
Obr. 56 Celá zapalovací cívka Bosch.....	63
Obr. 57 Schéma dvoujiskrových cívek s oscilátorem sekundárního napětí.....	64
Obr. 58 Čtyřjiskrová zapalovací cívka.....	64
Obr. 59 Závislost vysokého napětí na frekvenci zážehu.....	66
Obr. 60 Produkce plynu Nox.....	67
Obr. 61 Koronový výboj z hrotu.....	69
Obr. 62 Koronový výboj ze čtyř hrotů.....	69
Obr. 63 Schéma zapojení EcoFlash zapalování firmy BorgWarner Beru.....	70
Obr. 64 Závislost primárního proudu na čase, toč. momentu na čase.....	71
Obr. 65 Vzdušná jiskra a kluzná jiskra.....	73

Obr. 66 Odvedení tepla svíčkou.....	74
Obr. 67 Zapalovací svíčka Beru Ultra x Titan.....	74
Obr. 68 Zapalovací svíčka Beru Ultra a Beru Bi-Hex.....	75
Obr. 69 Konektor Beru.....	76
Obr. 70 Vysokofrekvenční výboj Beru.....	76
Obr. 71 Postup výroby zapalovacích svíček Beru.....	77
Obr. 72 Porovnání klasické indukční svíčky s laserovou svíčkou.....	78
Obr. 73 Schéma Nd:YAG laseru.....	80
Obr. 74 Použití multiplexního systému vedení laseru optickými vlákny.....	82
Obr. 75 Laserová zapalovací svíčka Jenbach.....	82
Obr. 76 Porovnání zapalovacích svíček a uspořádání.....	83

Seznam tabulek

Tab. 1 Historický vývoj.....	13
Tab. 2 Typy pevnolátkových laserů.....	79