



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## POHONNÉ JEDNOTKY S PŘÍMÝM VSTŘIKEM BENZÍNU

COMBUSTION ENGINES WITH GASOLINE DIRECT INJECTION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radek Schulla

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

BRNO 2019

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	<b>Radek Schulla</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Radim Dundálek, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Pohonné jednotky s přímým vstřikem benzínu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Skladba palivového systému pro přímý vstřik benzínu. Zamyšlení nad perspektivou budoucího vývoje přeplňovaných benzínových motorů s ohledem na snižování škodlivin ve výfukových plynech.

### **Cíle bakalářské práce:**

Uvedení přehledu pohonných jednotek s přímým vstřikem benzínu, přehled klíčových komponentů. Výhody a nevýhody s ohledem na plnění emisních limitů. Specifické vlastnosti, provozní spolehlivost. Příklady řešení systému u konkrétních pohonných jednotek.

### **Seznam doporučené literatury:**

STONE, Richard. Introduction to Internal Combustion Engines. 3rd edition. Hampshire: Palgrave, 1999. ISBN 0-333-74013-01999.

HEISLER, Heinz. Advanced Engine Technology. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. ISBN 1-56091-734-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce řeší problematiku přímého vstřikování benzínu u zážehových motorů. Uvádí základní přehled škodlivých látek výfukových plynů, funkce jednotlivých komponent palivového systému a jejich vývoj. Vysvětluje princip činnosti, výhody a nevýhody oproti nepřímému vstřiku. V závěru se zabývá využitím přímého vstřikování v budoucnosti.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Přímý vstřik benzínu, zážehový motor, palivový systém, vrstvené plnění, homogenní směs, emise

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the problematics of direct gasoline injection in petrol engines. It presents basic overview of pollutants from exhaust gases, functions of individual components of fuel system and their development. Next chapter explains the principle of operation, advantages and disadvantages compared to port fuel injection. The last section is focused on use of direct injection in the future.

## KEYWORDS

Gasoline direct injection, petrol engine, fuel system, stratified charge, homogeneous mixture, emission

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SCHULLA, Radek. *Pohonné jednotky s přímým vstřikem benzínu*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117217>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Radim Dundálek.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Radek Schulla

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při psaní této bakalářské práce.

## OBSAH

Úvod .....	9
1 Historie .....	10
2 Emise .....	11
2.1 Hlavní složky výfukových plynů .....	11
2.2 Škodlivé látky .....	11
2.3 Srovnání přímého a nepřímého vstřiku .....	12
3 Popis principu a funkce přímého vstřikování .....	14
3.1 Proces spalování .....	14
3.2 Tvorba směsi .....	15
3.3 Druhy provozu .....	17
4 Komponenty palivového systému .....	19
4.1 Nízkotlaký okruh .....	20
4.2 Vysokotlaký okruh .....	21
5 Koncepty automobilových výrobců .....	30
5.1 FSI .....	30
5.2 TSI .....	30
5.3 D-4 .....	31
5.4 SCC .....	31
6 Přehled motorů s přímým vstřikováním benzínu .....	32
7 Budoucnost přímého vstřikování benzínu .....	34
7.1 HCCI .....	34
7.2 SPCCI (Skyactiv-X) .....	35
Závěr .....	36
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	39

## ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá pohonnými jednotkami osobních automobilů s přímým vstřikem benzínu. Cílem je uvedení přehledu klíčových komponentů palivového systému pro přímý vstřik benzínu, jejich specifické vlastnosti, výhody, nevýhody s ohledem na plnění emisních limitů a některé příklady řešení u konkrétních pohonných jednotek.

První kapitoly jsou zaměřeny na historii přímého vstřikování benzínu, hlavní složky výfukových plynů a s tím spojenou produkci škodlivých látek (emisí) a porovnání přímého a nepřímého vstřiku v plnění emisních norem. V dalších kapitolách bude detailně popsán princip vytváření směsi paliva se vzduchem ve spalovacím prostoru, různé procesy spalování této směsi a druhy provozu, kterými motor disponuje, aby pracoval co nejefektivněji. Podrobně budou uvedeny jednotlivé komponenty palivového systému pro přímý vstřik benzínu, jejich funkce, hlavní rozdíly oproti nepřímému vstřiku a vývoj v posledních letech. Závěrečné kapitoly se zaměří na některé koncepty automobilových výrobců a na nové technologie, které jsou ve vývoji a přímo souvisí s přímým vstřikem benzínu.

Přímé vstřikování benzínu se objevilo už za 2. světové války u leteckých motorů, ale vysoké požadavky na kvalitu materiálů, nedokonalosti elektronických zařízení a použitých technologií bránily uvedení tohoto systému do sériové výroby. To se povedlo až Mitsubishi v roce 1996 a od té doby je přímý vstřik automobilkami stále více prosazován. Hlavní předností je možnost přesněji dávkovat palivo do válce, snižovat tak spotřebu paliva a množství vyprodukovaných škodlivých látek, protože emisní limity se neustále zpřísňují a splnění těchto norem je čím dál více technicky náročnější. Nevýhodou přímého vstřiku je vznik pevných částic a nebezpečných oxidů dusíku. Pohonná jednotka tak musí být vybavena oxidačním a absorpčním katalytickým konvertorem, filtrem pevných částic a dalšími komponenty, které výrazně zvyšují výrobní náklady a případné opravy.

## 1 HISTORIE

Poptávka po výkonnějších zážehových motorech spojená s požadavkem ke snížení spotřeby paliva vedla ke „znovuobjevení“ přímého vstřikování benzínu. Tento princip ovšem není žádnou novinkou. [1]

První pokusy sahají až na začátek 20. století. V roce 1925 švédský konstruktér Jonas Hesselman sestrojil první motor s přímým vstřikováním, který spaloval jak benzín, tak naftu. Během 2. světové války se přímé vstřikování benzínu využívalo takřka u všech vysoce výkonných leteckých motorů od výrobců jako BMW, Daimler-Benz nebo Junkers. Do automobilového průmyslu poprvé přišlo v roce 1952 s auty Goliath GP700E a Gutbrod Superior 600, které měly dvoutaktní motor. První čtyřtákní motor s přímým vstřikováním benzínu se objevil roku 1954 ve sportovním voze Mercedes-Benz 300 SL. Tento motor měl o 25 % vyšší výkon, než jeho předchozí verze, která využívala tradiční karburátory. Ovšem v této době, návrh a výroba takového motoru byla velice složitá. Tato technologie kladla velmi vysoké požadavky na použité materiály a dalším problémem byla vysoká cena a také velice krátké servisní intervaly. Všechny tyto věci přispěly k tomu, že trvalo dlouho, než došlo k zásadnímu průlomům v této oblasti. [1] [2]

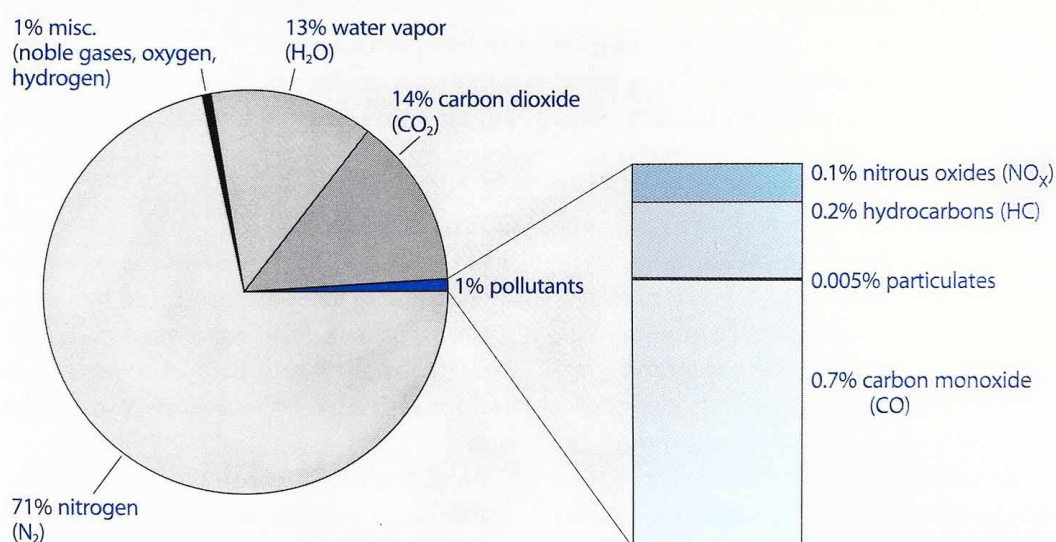
V 70. letech se americké automobilky AMC a Ford snažily vyvinout motor s přímým vstřikem benzínu, ale kvůli nedokonalé elektronice, vysokým nákladům a také ropné krizi se rozhodly nepokračovat ve vývoji. Až v roce 1996 přišlo Mitsubishi s modelem Galant se systémem přímého vstřikování benzínu, který nazvalo GDI (Gasoline Direct Injection) a začalo tento systém rozšiřovat i do ostatních modelů. Další automobilky rychle následovaly s vlastními řešeními jako třeba Toyota v roce 1998 se systémem nazvaným D4 nebo Volkswagen s názvem FSI v roce 2000. [2]



*Obr. 1 Mitsubishi Galant 1996 [3]*

## 2 EMISE

Spalovací proces je ve skutečnosti navržen tak, aby neprodukoval téměř žádné emise, protože při spalování uhlovodíkových paliv se vzduchem vznikne dokonalou oxidací oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) a voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Reálně je ale nemožné tohoto dosáhnout (např. kvůli neodpařeným kapičkám paliva nebo nečistotám obsažených v palivu) a vznikají tak vedlejší toxické produkty (emise) způsobené nedokonalou oxidací. [4] [5]



Obr. 2 Složení výfukových plynů zážehových motorů – 71 % dusíku, 14 % oxidu uhličitého, 13 % vodní páry, 1 % inertních plynů a 1 % škodlivých látek. Ty se skládají z 0,7 % oxidu uhelnatého, 0,2 % uhlovodíků, 0,1 % oxidů dusíku a 0,005 % pevných částic [1]

### 2.1 HLAVNÍ SLOŽKY VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Dusík ( $\text{N}_2$ ) tvoří většinu atmosféry, a protože ve spalovacím procesu nehraje téměř žádnou roli, vytváří asi 71% spalin. Vodík a uhlík obsažený v palivu reaguje s kyslíkem ve vzduchu a vzniká vodní pára ( $\text{H}_2\text{O}$ ) a oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ). Ten není u motorových vozidel klasifikován jako škodlivá látka. Je však jednou z látek, která způsobuje skleníkový efekt. Ovšem produkce  $\text{CO}_2$  je přímo úměrná spotřebě paliva tzn., že snížení tvorby  $\text{CO}_2$  lze dosáhnout pouze snížením spotřeby paliva. [1]

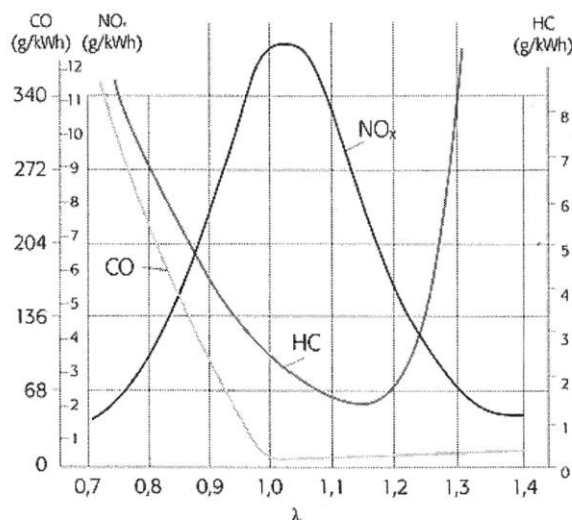
### 2.2 ŠKODLIVÉ LÁTKY

Oxid uhelnatý (CO) je produktem nedokonalé oxidace uhlíku obsaženého v uhlovodíkovém palivu. Prioritní příčinou jeho výskytu ve spalinách je nedostatek kyslíku ve spalované směsi. Znamená to provoz, kdy je součinitel přebytku vzduchu  $\lambda < 1$  – bohatá směs. [5]

Za vysokých teplot ve spalovacím prostoru vznikají oxidací vzdušného dusíku oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ). Nejvyšších teplot lze dosáhnout spalováním mírně bohatých směsí, ale hlavním faktorem je dostatečný obsah kyslíku. Proto je maximum koncentrace  $\text{NO}_x$  při  $\lambda = 1,05 - 1,1$ . [5]

Nespálené uhlovodíky (HC) jsou ve výfukových plynech obsaženy jako výsledek předčasně zastavených oxidačních reakcí v některých zónách spalovacího prostoru (nejčastěji při chladnějších stěnách válce). Optimální směšovací poměr je v oblasti chudé směsi  $\lambda = 1,1 - 1,2$ . [5]

Emise pevných částic (PM) souvisí zejména s kvalitou rozprášení paliva při jeho vstřikování do válce. S větším množstvím vzduchu ve směsi se zlepšuje přísun kyslíku k částicím paliva a emise pevných částic se snižují. [5]

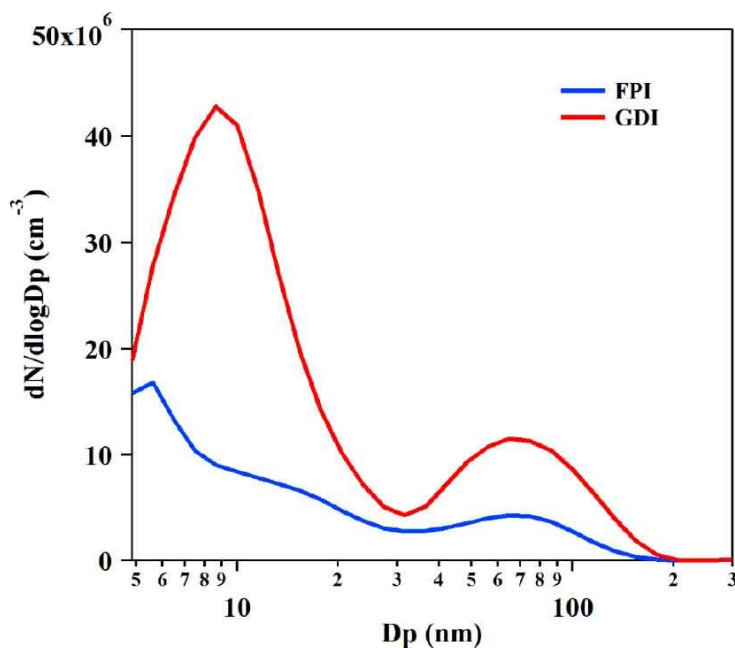


Obr. 3 Produkce emisí zážehového motoru v závislosti na  $\lambda$  [5]

## 2.3 SROVNÁNÍ PŘÍMÉHO A NEPŘÍMÉHO VSTŘIKU

Hlavní výhodou přímého vstřiku je menší spotřeba paliva než u vstřiku nepřímého, což znamená, že produkce CO<sub>2</sub> je menší. U přímého vstřiku navíc máme větší kontrolu nad směsí ve spalovacím prostoru a můžeme tak lépe regulovat celkové úrovně emisí. [6]

Nevýhoda je v režimu vrstveného spalování (více v kapitole 3.2), které se využívá při menším zatížení. Motor si vystačí s velmi chudou směsí, tedy s velkým přebytkem vzduchu a dochází ke zvýšené tvorbě NO<sub>x</sub>. Zdaleka největší nevýhodou je ale větší produkce pevných částic. Moderní motory s přímým vstřikem jich dokonce tvoří i více než současné vznětové motory. Navíc tyto pevné částice jsou ještě menší než ty, které vznikají ve vznětových pohonných jednotkách. [6] [7]



Obr. 4 Srovnání množství (osa y) a velikosti pevných částic (osa x) produkovaných motory s přímým (červená křivka) a nepřímým vstřikováním (modrá křivka) [8]

## EMISNÍ NORMY

Euro je závazná emisní norma stanovující limitní hodnoty výfukových plynů. Hodnoty se udávají v gramech na kilometr. První emisní norma se objevila až v roce 1992 a s každou novou generací emisní normy se snižují limity škodlivých látek. Od emisní normy Euro 5 se u zážehových motorů omezuje i množství pevných částic, ovšem tyto hodnoty (v tabulce 1 označené \*) platí pouze pro motory s přímým vstřikováním, nepřímý vstřik tato omezení nemá. [9]

Tab. 1 Standardní limity emisí EU benzínových motorů u osobních vozidel do 3,5 t [5]

		[g · km <sup>-1</sup> ]				
předpis	platnost od	CO	HC	HC + NO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	PM
Euro 1	1992.07	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	-
Euro 2	1996.01	2,2	-	0,5	-	-
Euro 3	2000.01	1,2	0,2	-	0,15	-
Euro 4	2005.01	1	0,1	-	0,08	-
Euro 5	2009.09	1	0,1	-	0,06	0,005*
Euro 6	2014.09	1	0,1	-	0,06	0,005*

### 3 POPIS PRINCIPU A FUNKCE PŘÍMÉHO VSTŘIKOVÁNÍ

Motory s přímým vstřikováním benzínu vytváří směs paliva se vzduchem ve spalovacím prostoru. Palivo je vstřikováno přímo do spalovacího prostoru vstřikovacími ventily. Otevřeným sacím ventilem proudí v době sání pouze vzduch potřebný ke spalování, na rozdíl od nepřímého vstřikování, kde se palivo vstřikuje už do sacího potrubí a do válce proudí směs paliva se vzduchem. [5]

Hlavními výhodami přímého vstřikování je větší úspora paliva a vyšší výkon motoru. Navíc benzín vstřikovaný přímo do spalovacího prostoru má současně chladicí funkci. Když se odpařuje, tak odebírá část tepla spalovacímu prostoru. Tímto se značně snižuje šance samozápalu, kdy dochází k zažehnutí směsi dříve, než přeskočí jiskra na zapalovací svíčke. Díky tomu lze zvýšit kompresní poměr a tím i účinnost motoru. [7]

Nevýhodou je, že na jemné rozprášení paliva je potřeba vysoký vstřikovací tlak, který je dnes běžně kolem 20 MPa, což klade vysoké nároky na konstrukci vstřikovacích ventilů. Dalším problémem je, že nevhodně rozprášené palivo neshoří kompletně. Vstřikovací ventily, zapalovací svíčka a zejména talíře sacích ventilů se pak zanáší karbonovými úsadami, což má za následek postupné snižování výkonu motoru. [2] [7]

#### 3.1 PROCES SPALOVÁNÍ

Jako proces spalování se označují druh a způsob, jakými jsou ve spalovacím prostoru realizovány tvorba směsi a přeměna energie. Tyto procesy jsou určeny tvarem spalovací komory, sacího potrubí a umístěním vstřikovacího ventilu. Pro dosažení požadovaného vrstvení směsi vstřikuje vstřikovací ventil palivo do proudění vzduchu tak, aby se palivo odpařilo v přesně definované oblasti. Proudění vzduchu odnáší oblak směsi k zapalovací svíčke tak, že k ní dorazí v okamžiku zážehu. Jsou možné dva principiálně odlišné procesy spalování. První je označován jako proces spalování vedený paprskem a druhý je nazýván jako proces spalování vedený stěnami. [1] [5]

##### PROCES SPALOVÁNÍ VEDENÝ PAPSREM

Proces spalování vedený paprskem se vyznačuje tím, že palivo je vstřiknuto v bezprostřední blízkosti zapalovací svíčky a zde se odpaří. To vyžaduje přesné umístění zapalovací svíčky a vstřikovací trysky a přesné nasměrování paprsku, aby směs mohla být zapálena ve správný okamžik. Zatížení zapalovací svíčky výměnou tepla je hodně vysoké, protože je za určitých podmínek přímo smáčena vstřikovaným palivem. [5]

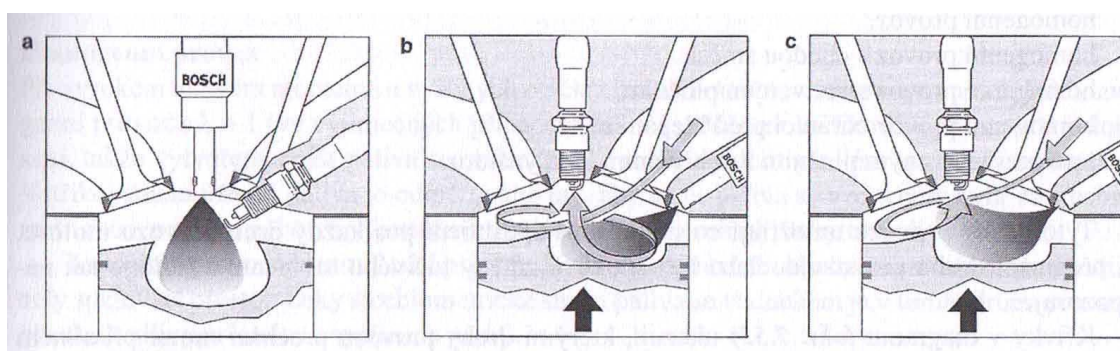
Tyto systémy používají vysoké tlaky (15 MPa a vyšší) a vstřikovací ventily s víceotvorovou tryskou umístěné v horní části spalovací komory, které zaručí velice jemné rozprášení paliva, aby se co nejrychleji mohlo odpařit. [10]

### PROCES SPALOVÁNÍ VEDEDÝ STĚNAMI

Při procesu spalování vedeném stěnami se rozlišuje mezi dvěma možnými prouděními vzduchu, které vznikají cíleným uspořádáním sacích kanálů a tvaru pístu. Vznikající směs paliva se vzduchem dospěje s tímto prouděním jako uzavřený oblak k zapalovací svíčke. [5]

Používají se nižší tlaky okolo 5 MPa a vstřikovací ventily s jednotvorovou tryskou umístěné na straně spalovací komory mezi sacími ventily. [10]

Tento proces můžeme ještě rozdělit na vířivé proudění a valivé proudění. U vířivého proudění vzduch nasávaný pístem přes otevřený sací ventil vytváří turbulentní proudění podél stěny válce. Při valivém proudění, vzniká proudění vzduchu, které vychází ze shora, mění směr v prohlubni vytvarované v pístu a pohybuje se opět nahoru směrem k zapalovací svíčke. [5]



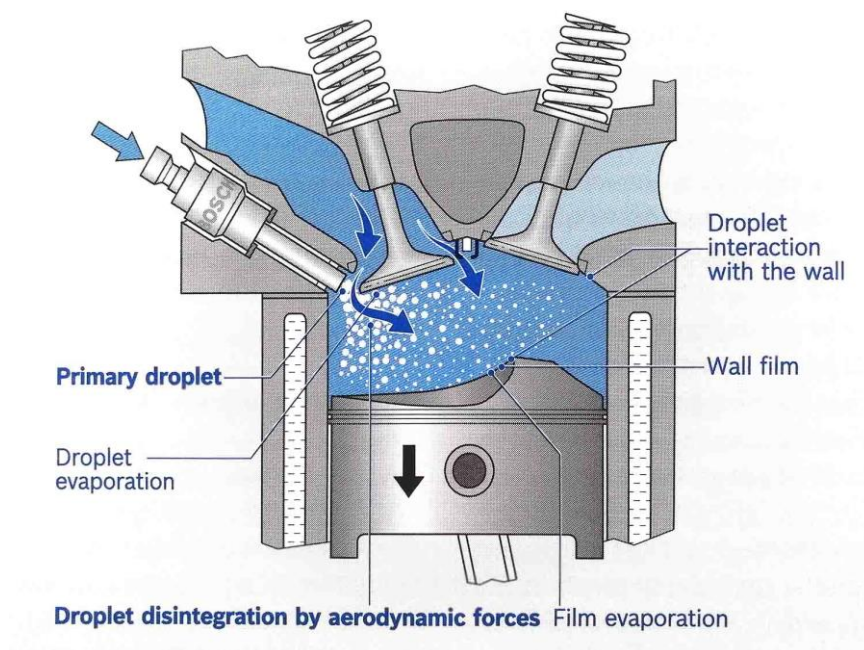
Obr. 5 Poměry proudění při různých procesech spalování  
a – vedené paprskem, b – vířivé proudění vedené stěnami, c – valivé proudění vedené stěnami [5]

### 3.2 TVORBA SMĚSI

Úkolem tvorby směsi je příprava pokud možno homogenní hořlavé směsi paliva se vzduchem. Při homogenním provozu má být tato směs v celém spalovacím prostoru homogenní. Při provozu s vrstveným plněním je naproti tomu směs homogenní jen v určité prostorově vymezené oblasti, zatímco ve zbývajícím spalovacím prostoru se nachází čerstvý vzduch nebo inertní plyny. Směs plynů, příp. plynů a par, může být homogenní jen tehdy, pokud se všechno palivo odpařilo. Vliv na odpařování má hlavně teplota ve spalovacím prostoru, velikost kapek a čas, který je k dispozici pro odpaření. [5]

#### TVORBA SMĚSI PŘI HOMOGENNÍM PROVOZU

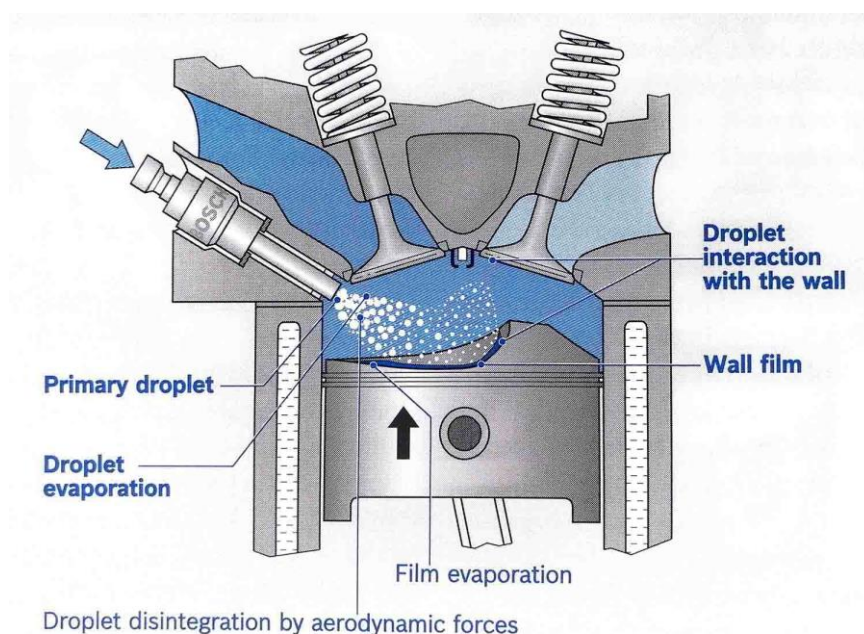
Aby bylo pro vytvoření směsi k dispozici co nejvíce času, vstřikuje se palivo co možná nejdříve. Proto se vstřikuje již při sání. Nasávaný vzduch pomáhá palivu se rychleji odpařovat a zajišťuje dobré promíchání směsi. K tvorbě směsi přispívá především vysoká rychlost proudění vzduchu a jeho aerodynamické síly v oblasti sacího ventilu. [1] [5]



Obr. 6 Mechanismus tvorby směsi při homogenním provozu. Kapičky paliva se postupně rozpadají a vypařují vlivem aerodynamických sil při nasávání vzduchu. [1]

#### TVORBA SMĚSI PŘI PROVOZU S VRSTVENÝM PLNĚNÍM

Pro provoz s vrstveným plněním je rozhodující vytvoření hořlavého oblaku směsi, který se v době zážehu nachází v oblasti zapalovací svíčky. K tomu je palivo během komprese vstřikováno tak, aby vznikl oblak směsi, který je prouděním vzduchu ve spalovacím prostoru a pístem pohybujícím se nahoru přemístěn do oblasti zapalovací svíčky. [5]



Obr. 7 Mechanismus tvorby směsi při provozu s vrstveným plněním. Kapičky paliva se odpařují vlivem vysokého tlaku a teploty stlačeného vzduchu. Prohlubní a pohybem pístu nahoru jsou přemístěny do oblasti zapalovací svíčky. [1]

### 3.3 DRUHY PROVOZU

Druhy provozu umožňují co nejlepší přizpůsobení pro každý druh provozu motoru. K přepínání druhu provozu dochází bez skokové změny točivého momentu a řidič je tak nezpozoruje. Výběr druhu provozu se provádí např. podle otáček a požadovaného točivého momentu nebo podle funkčních požadavků, např. regenerace zásobníkového katalyzátoru. U přímého vstřikování benzínu je známých šest druhů provozu. [5]

#### HOMOGENNÍ PROVOZ

Při vysokém točivém momentu a vysokých otáčkách používá motor homogenní provoz se stechiometrickou směsí paliva se vzduchem ( $\lambda = 1$ ). Počátek vstřikování paliva leží v době sání, takže vytvořená směs paliva se vzduchem se může rozdělit v celém objemu spalovacího prostoru. Díky stechiometrické směsi paliva se vzduchem je ve spalínách nízký obsah škodlivých látek. [5]

#### PROVOZ S VRSTVENÝM PLNĚNÍM

V oblasti nižšího točivého momentu při otáčkách do cca  $3000 \text{ min}^{-1}$  pracuje motor s vrstveným plněním. Vstřikovací ventil vstřikuje palivo v době komprese krátce před okamžikem zážehu. Během krátké doby do okamžiku zážehu přesouvá proudění vzduchu ve válci připravenou směs paliva se vzduchem k zapalovací svíčke. Kvůli pozdnímu okamžiku vstřiku nedojde k rozdělení směsi v celém spalovacím prostoru. Kvůli velkému přebytku vzduchu je obsah emisí  $\text{NO}_x$  velmi vysoký. [5]

#### HOMOGENNÍ PROVOZ S CHUDOU SMĚSÍ

V přechodové oblasti mezi provozem s vrstveným plněním a homogenním provozem může motor pracovat s homogenní chudou směsí ( $\lambda > 1$ ). Spotřeba paliva vůči homogennímu provozu s  $\lambda = 1$  je nižší, protože ztráty způsobené výměnou obsahu válce jsou díky otevřené škrtkové klapce nižší. [5]

#### HOMOGENNÍ PROVOZ S VRSTVENÝM PLNĚNÍM

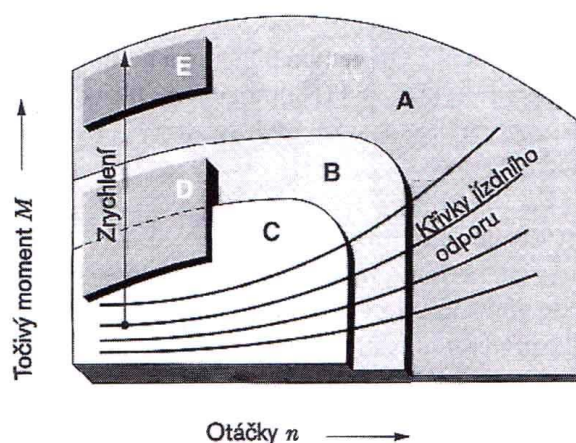
Při homogenním provozu s vrstveným plněním je celý spalovací prostor naplněn homogenní chudou základní směsí. Tato směs vzniká vstříknutím malého množství paliva v době sání. Ke druhému vstříknutí paliva dojde v době komprese. Tím vznikne oblast s bohatší směsí okolo zapalovací svíčky, která je lehce zápalná a dokáže svým plamenem zapálit homogenní chudou směs ve zbývajícím spalovacím prostoru. Tento provoz je aktivován po několika pracovních cyklech během přepnutí mezi provozem s vrstveným plněním a homogenním provozem. Rozdělení paliva mezi oběma vstřiky je přibližně 3:1. To znamená, že 75 % paliva je vstříknuto již při prvním vstřiku. [5]

### HOMOGENNÍ PROVOZ CHRÁNÍCÍ PŘED KLEPÁNÍM

Při tomto druhu provozu není nutné díky dvojímu vstřikování při plném zatížení provádět přestavení předstihu směrem k „později“ k zamezení klepání, protože vrstvení náplně brání klepání. Z výhodnějšího předstihu současně vyplývá vyšší točivý moment. [5]

### PROVOZ S VRSTVENÝM PLNĚNÍM A ZAHŘÍVÁNÍM KATALYZÁTORU

Tento druh provozu umožňuje rychlé zahřátí výfukového systému. Palivo se vstřikuje nejprve v době komprese a pak ještě jednou v době expanze. Tato část paliva shoří velmi pozdě a silně zahřívá stranu výfuku a výfukové potrubí. Dalším důležitým případem použití je zahřátí katalyzátoru  $\text{NO}_x$  na teploty přes  $650\text{ }^\circ\text{C}$ , aby se zahájilo jeho odsíření. [5]



Obr. 8 Charakteristika druhů provozu přímého vstřikování benzínu [5]

A – homogenní provoz s  $\lambda = 1$ ; tento druh provozu je možný ve všech oblastech; B – provoz s chudou náplní nebo homogenní provoz s  $\lambda = 1$  s recirkulací spalin; tento druh provozu je také možný v oblasti C a D; C – provoz s vrstveným plněním s recirkulací spalin;

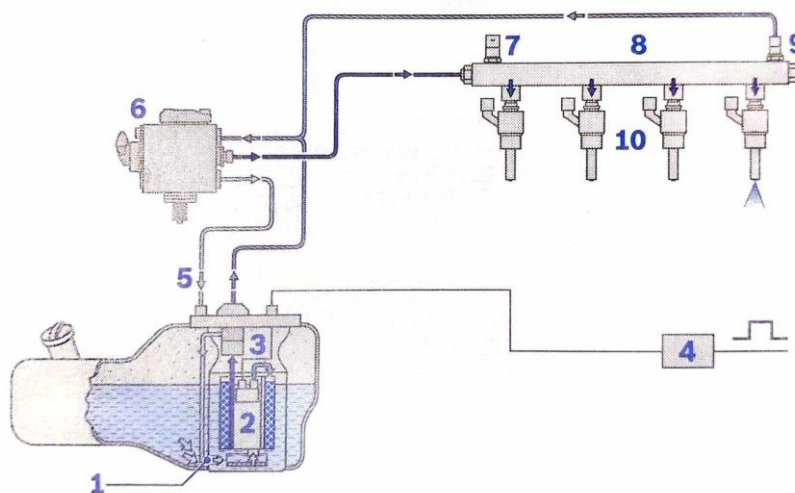
Druhy provozu s dvojím vstřikováním: C – provoz s vrstveným plněním a zahříváním katalyzátoru; D – homogenní provoz s vrstveným plněním; E – homogenní provoz chránící před klepáním [5]

## 4 KOMPONENTY PALIVOVÉHO SYSTÉMU

V porovnání s nepřímým vstřikem je u přímého vstřiku omezený časový úsek, kdy lze palivo vstříknout do spalovací komory. Proto musí být palivo vstříknuto pod mnohonásobně vyšším tlakem než u nepřímého vstřiku. Palivový systém je pak rozdělen na nízkotlaký a vysokotlaký okruh. [1]

Elektrické palivové čerpadlo dopravuje palivo přes filtr s podávacím tlakem 0,3 – 0,5 MPa k vysokotlakému čerpadlu. Vysokotlaké čerpadlo vytváří v závislosti na pracovním režimu motoru (požadovaný točivý moment a otáčky) systémový tlak. Palivo pod vysokým tlakem proudí do tlakového zásobníku (rail). Tlak paliva je měřen snímačem vysokého tlaku a pomocí ventilu pro regulaci je udržován na hodnotě mezi 5 – 12 MPa. Na tlakovém zásobníku označovaném také jako „Common Rail“, jsou umístěny vysokotlaké vstřikovací ventily. Jsou aktivovány řídicí jednotkou motoru a vstříkují palivo do spalovacího prostoru válce. [5]

V současné době je na trhu druhá generace přímého vstřikování. Liší se od první generace nárůstem vstřikovacího tlaku až na 20 MPa. Elektromagnetické vstřikovače jsou nahrazeny piezovstřikovači s rychlou odezvou a možností použití několika vstříků v krátkých intervalech za sebou. To vše vede k rozšíření oblasti s možností spalování vrstvené směsi do vyšších otáček a většího točivého momentu motoru. [5]



Obr. 9 Schéma palivového systému (1. i 2. generace) [1]

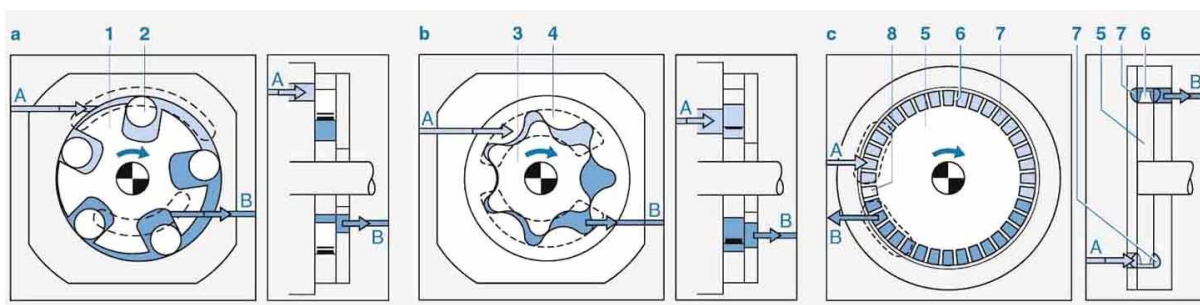
- |                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 – tryska sacího proudového čerpadla | 6 – vysokotlaké čerpadlo             |
| 2 – palivové čerpadlo s filtrem       | 7 – snímač tlaku paliva              |
| 3 – pojistný ventil a snímač tlaku    | 8 – tlakový zásobník paliva          |
| 4 – elektronika pro řízení čerpadla   | 9 – ventil pro řízení tlaku          |
| 5 – zpětné vedení paliva              | 10 – vysokotlaké vstřikovací ventily |

## 4.1 NÍZKOTLAKÝ OKRUH

### 4.1.1 ELEKTRICKÉ PALIVOVÉ ČERPADLO

Elektrické palivové čerpadlo musí za každého provozního stavu dopravit dostatek paliva do motoru, v případě přímého vstřiku do vysokotlakého čerpadla. Nejdůležitějším požadavkem na toto čerpadlo je dodávat mezi 60 – 250 litry paliva za hodinu a vytvořit tlak v palivovém systému mezi 0,3 – 0,7 MPa. [1]

Hlavní částí je rotační čerpadlo, které je poháněno elektromotorem a kryt, ve kterém jsou umístěny ventily a elektrické připojení. Obvyklé umístění je uvnitř palivové nádrže. Pokud je čerpadlo ponořené, palivo snižuje hluk vydávaný elektromotorem a zároveň zajišťuje jeho mazání. [1] [11]



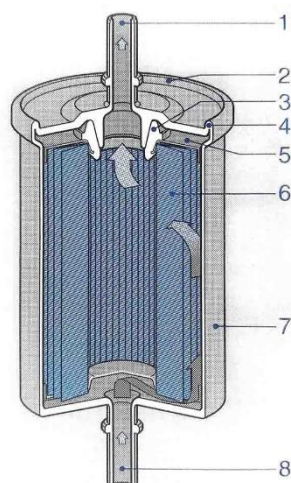
Obr. 10 Typy využívaných rotačních čerpadel  
a – lamelové čerpadlo, b – zubové čerpadlo, c – obvodové čerpadlo [1]

A – sání paliva	B – výtlak paliva
1 – rotor s drážkami	5 – oběžné kolo
2 – lamela (ve tvaru válečku)	6 – lopatky
3 – vnitřní hnací kolo	7 – průchod po obvodu
4 – rotor	8 – zátka

### 4.1.2 PALIVOVÝ FILTR

Funkcí palivového filtru je zamezit vniknutí nečistot z paliva do palivového systému, kde se mohou usazovat a poškodit vysokotlaké čerpadlo nebo ucpat vstřikovací ventily. Uvnitř filtru se nachází speciálně impregnovaný filtrační papír z mikrovláken, který tyto drobné nečistoty zachycuje. Papír je do krytu vložen složený ve tvaru hvězdy a nefiltrované palivo protéká z vnější strany dovnitř. [1]

Požadovaná jemnost filtračního papíru je závislá na použitém systému vstřikování paliva. U nepřímého vstřiku je dostatečná pórovitost 10  $\mu\text{m}$ . Přímý vstřik vyžaduje jemnější filtry. Průměrná pórovitost filtračního papíru má být maximálně 5  $\mu\text{m}$  a musí zachytit minimálně 85% všech částic, které jsou větší než 5  $\mu\text{m}$ . [1]



Obr. 11 Řez palivovým filtrem [1]

- |                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| 1 – odvod paliva    | 5 – podpůrný kroužek |
| 2 – víko filtru     | 6 – filtrační papír  |
| 3 – těsnící kroužek | 7 – kryt filtru      |
| 4 – svařená hrana   | 8 – přívod paliva    |

## 4.2 VYSOKOTLAKÝ OKRUH

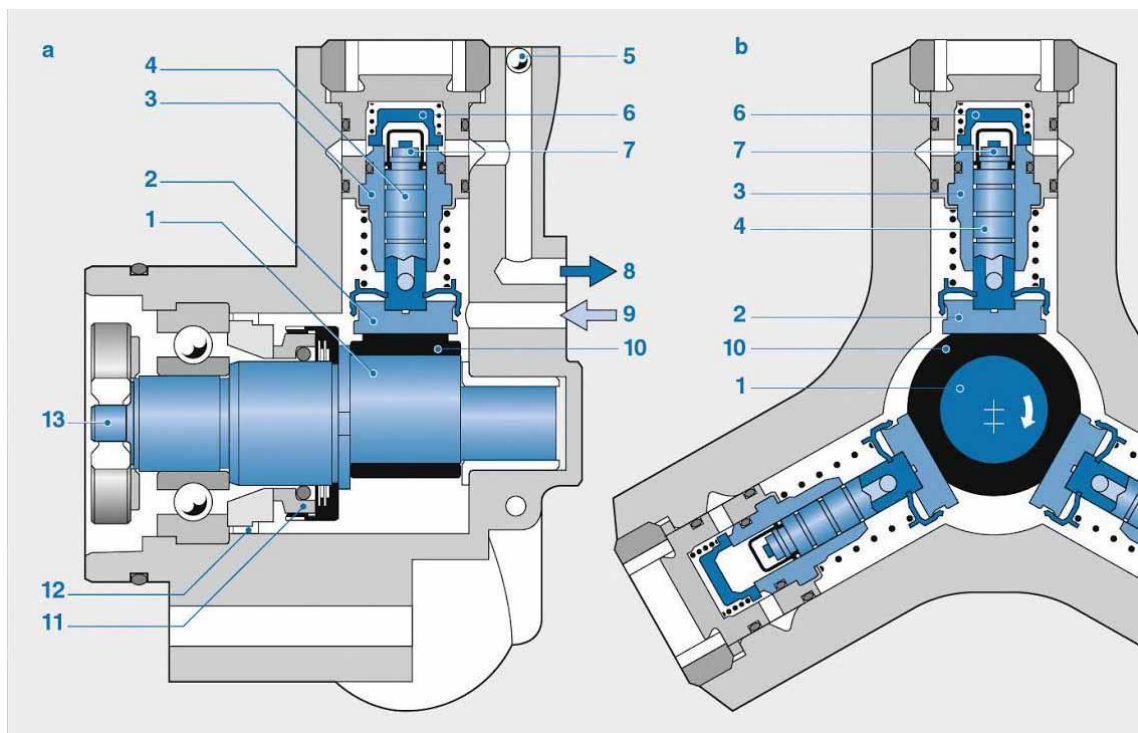
### 4.2.1 VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO

Vysokotlaké čerpadlo (německy: **Hochdruckpumpe**, proto zkratka HDP) má za úkol stlačovat palivo dodávané elektrickým palivovým čerpadlem, na tlak potřebný pro vysokotlaké vstřikování, tedy 5 – 20 MPa. Pulsace způsobené vysokotlakým čerpadlem musejí být co nejmenší, aby se snadno odstranily v tlakovém zásobníku. Používá se několik druhů vysokotlakých čerpadel pro různé vstřikovací systémy. [1] [5]

#### VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO HDP1

HDP1 je radiální pístové čerpadlo se třemi válci používané u první generace přímého vstřikování. Aby se dosáhlo malé zbytkové pulsace, válce jsou vůči sobě pootočený o 120 °. Chlazení a mazání čerpadla je zajištěno protékajícím palivem. Vačkový hřídel motoru pohání hnací hřídel (13) s excentrem (1). Rotační pohyb excentru se přes zdvihový kroužek (10) a kluzný segment (2) převádí na vertikální posuv pístu (4). Při pohybu pístu dolů proudí palivo dutým pístem přes vstupní ventil (7) do válce. Při pohybu pístu nahoru je palivo stlačováno a po dosažení potřebného tlaku je přes výstupní ventil (6) dopraveno k vysokotlaké přípojce (8). [1] [5]

Dopravované množství je přímo úměrné otáčkám. Maximální možné dodávané množství je o něco větší než maximální spotřeba paliva, aby bylo spolehlivě zajištěno dostatečné množství a aby bylo ohřívání paliva v zásobníku udržováno na nízké úrovni. [5]



Obr. 12 Podélný (a) a příčný řez (b) vysokotlakým čerpadlem HDP1 [1]

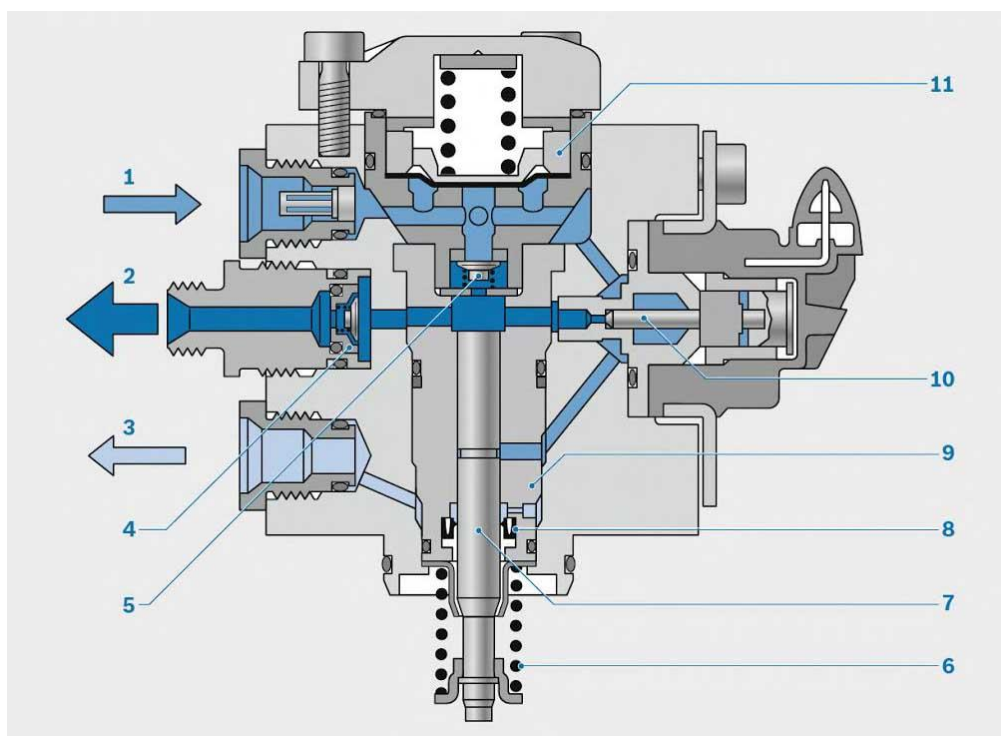
- |                               |                                    |
|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 – excentr                   | 8 – přípojka k tlakovému zásobníku |
| 2 – kluzný segment            | 9 – přívod paliva (nízký tlak)     |
| 3 – válec čerpadla            | 10 – zdvihový kroužek              |
| 4 – element čerpadla s pístem | 11 – axiálně působící těsnění      |
| 5 – uzavírací kulička         | 12 – statické těsnění              |
| 6 – výstupní ventil           | 13 – hnací hřídel                  |
| 7 – vstupní ventil            |                                    |

### VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO HDP2

HDP2 je radiální jednopístové čerpadlo s vestavěným regulačním ventilem dávkování paliva a tlumičem tlakových rázů používané u první generace přímého vstřikování. Čerpadlo je poháněno vačkovým hřídelem motoru. Rotace vačkového hřídele se přes vačku, jejíž tvar závisí na maximální možné spotřebě paliva, převádí na vertikální posuv pístu. [1]

Palivo dodávané elektrickým palivovým čerpadlem je nasáváno přes vstupní ventil (5) do válce a regulační ventil dávkování paliva (10) je zavřený. Poté začne píst (7) palivo stlačovat a po dosažení potřebného tlaku je přes výstupní ventil (4) dopraveno do tlakového

zásobníku. Pokud by došlo k nežádoucímu zvýšení tlaku při stlačování paliva, regulační ventil dávkování paliva se otevře a přebytečné palivo přepustí zpět do nízkotlakého okruhu. [1]



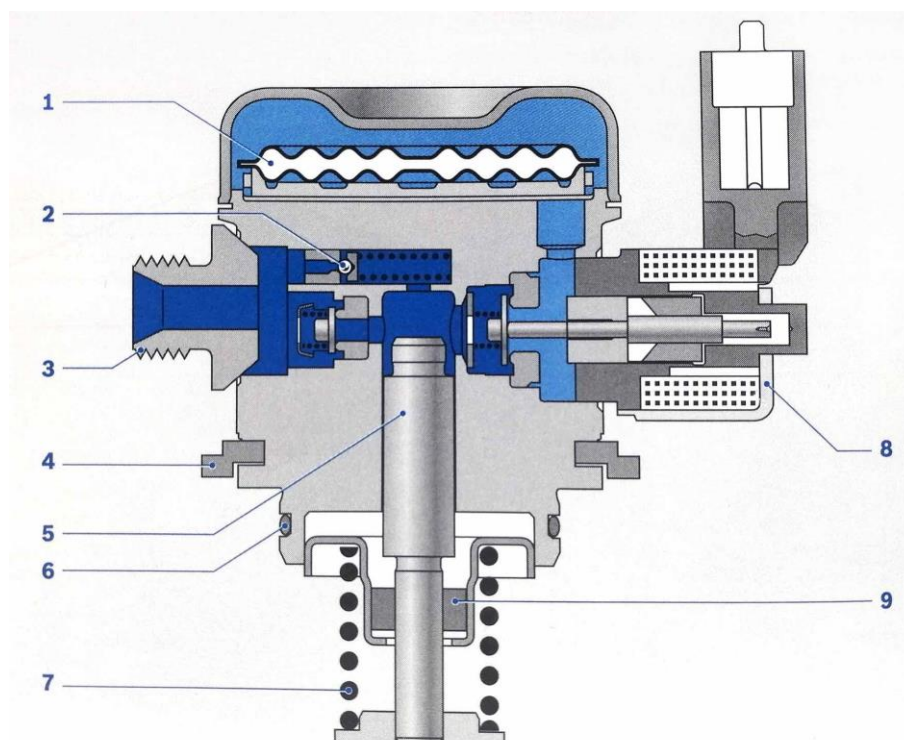
Obr. 13 Řez vysokotlakým čerpadlem HDP2 [1]

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| 1 – přívod paliva (nízký tlak)     | 7 – píst                               |
| 2 – přípojka k tlakovému zásobníku | 8 – těsnění pístu                      |
| 3 – zpětné vedení paliva           | 9 – válec čerpadla                     |
| 4 – výstupní ventil                | 10 – regulační ventil dávkování paliva |
| 5 – vstupní ventil                 | 11 – tlumič tlakových rázů             |
| 6 – pružina pístu                  |  |

### VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO HDP5

HDP5 je radiální jednopístové čerpadlo používané u druhé generace přímého vstřikování. Je poháněno vačkovým hřídelem motoru. Obsahuje regulační ventil dávkování paliva, pojistný ventil a tlumič tlakových rázů. Rotace vačky se na posuv pístu v případě vyšších otáček převádí přes válečkové zdvihátko. [1]

Čerpadlo je vhodné pro tlaky do 20 MPa a až do 8600 otáček za minutu (otáčky motoru). Také zvládne dopravit až 1 cm<sup>3</sup> paliva za jednu otáčku vačky, což je o 40 % více než čerpadlo HDP2. [1]



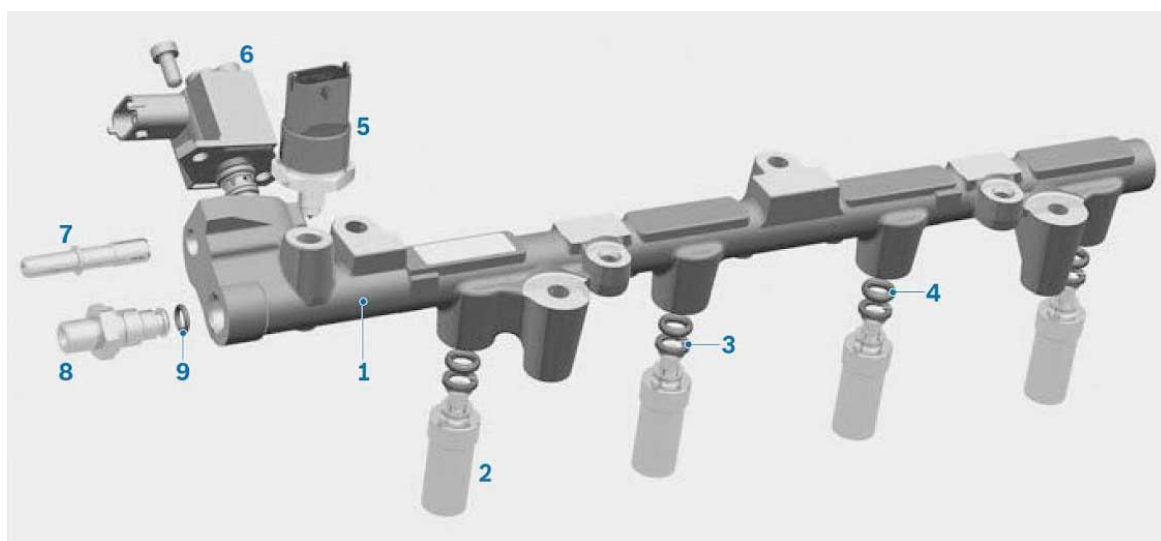
Obr. 14 Řez vysokotlakým čerpadlem HDP5 [1]

- |                                    |                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 – tlumič tlakových rázů          | 6 – těsnící kroužek                   |
| 2 – pojistný ventil                | 7 – pružina pístu                     |
| 3 – přípojka k tlakovému zásobníku | 8 – regulační ventil dávkování paliva |
| 4 – montážní příruba               | 9 – těsnění pístu                     |
| 5 – píst                           |                                       |

#### 4.2.2 TLAKOVÝ ZÁSOBNÍK PALIVA

Tlakový zásobník má za úkol ukládat palivo dodávané vysokotlakým čerpadlem a rozdělovat ho vysokotlakým vstřikovacím ventilům. Objem tlakového zásobníku musí být dostatečný k vyrovnání pulsací v palivovém okruhu, které jsou způsobeny odběrem paliva vstřikovacími ventily a dodávkou paliva čerpadlem. Provedení zásobníku (objem, rozměry, hmotnost atd.) závisí na motoru a použitém systému. Tlakový zásobník má přípojky pro další komponenty vstřikovacího systému (vysokotlaké čerpadlo, ventil pro řízení tlaku, snímač tlaku, vysokotlaké vstřikovací ventily). [5]

Tlakový zásobník pro první generaci přímého vstřikování je navržen pro tlaky do 12 MPa a je vyroben z hliníku. U druhé generace je vyroben z tvrdě pájené nerezové oceli a maximální povolený tlak je až 25 MPa. [1]



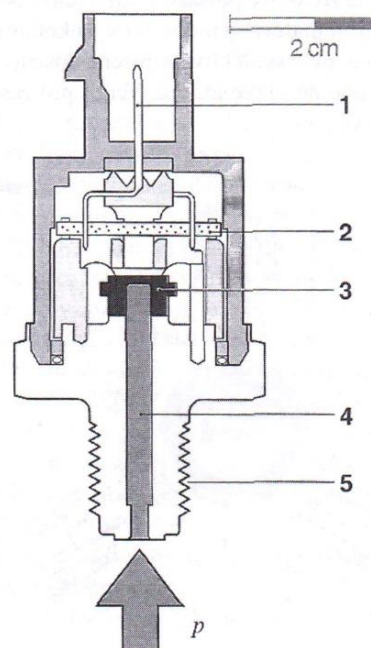
Obr. 15 Tlakový zásobník paliva (1. generace přímého vstřikování) [1]

- |   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1 – tlakový zásobník                          | 6 – ventil pro řízení tlaku |
| 2 – otvor pro připojení vstřikovacího ventilu | 7 – spojovací potrubí       |
| 3 – podpěrný kroužek                          | 8 – montážní otvor          |
| 4 – těsnicí kroužek                           | 9 – těsnicí kroužek         |
| 5 – snímač tlaku                              |                             |

#### 4.2.3 SNÍMAČ TLAKU PALIVA

Snímač tlaku měří tlak paliva v tlakovém zásobníku paliva. Přesné dodržení předepsaného tlaku paliva v zásobníku má velký význam pro emise škodlivých látek, hlučnost a výkon motoru. Přípustné tolerance pro tento snímač jsou velmi malé. Chyba měření je v hlavní pracovní oblasti menší než 2 % měřicího rozsahu. [5]

Jádro snímače je tvořeno ocelovou membránou (3), na které jsou napařeny tenzometry v můstkovém zapojení. Měřicí rozsah snímače závisí na tloušťce membrány. Jakmile měřený tlak přes tlakovou přípojku (4) působí na jednu stranu membrány, změní tenzometry svůj odpor. Napětí vzniklé v můstku 0 – 80 mV je propojovacími vodiči vedeno k vyhodnocovacímu obvodu (2) ve snímači. Ten zesílí signál můstku na 0 – 5 V a vede jej k řídicí jednotce, kde je pomocí uložené charakteristiky vypočítán tlak. [5]



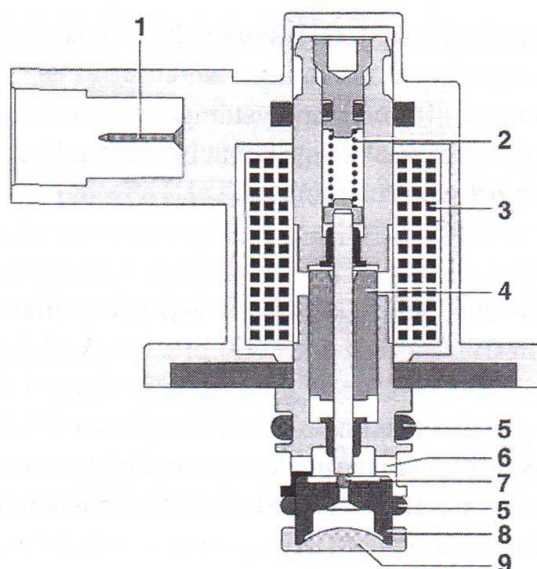
Obr. 16 Snímač tlaku v tlakovém zásobníku [5]

- |                                    |                      |
|------------------------------------|----------------------|
| 1 – elektrická přípojka (konektor) | 4 – tlaková přípojka |
| 2 – vyhodnocovací obvod            | 5 – upevňovací závit |
| 3 – ocelová membrána s tenzometry  |                      |

#### 4.2.4 VENTIL PRO ŘÍZENÍ TLAKU

Ventil pro řízení tlaku je umístěn mezi tlakovým zásobníkem a nízkotlakou stranou vysokotlakého čerpadla HDP1. Nastavuje požadovaný tlak v tlakovém zásobníku změnou průtočného průřezu tak, že palivo, které dodá čerpadlo navíc, dopravuje do nízkotlakého okruhu. [5]

Signál modulovaný šířkou impulsu řídí cívku (3). Kulička (7) se zvedne ze sedla ventilu (8) a mění dle potřeby průtočný průřez ventilu. Bez připojeného napětí je ventil zavřený, aby i při výpadku elektrického řízení byl zajištěn potřebný tlak v tlakovém zásobníku. V případě selhání tlačná pružina (2) zamezí zvýšení tlaku nad povolenou mez a nedojde tak k poškození komponent palivového systému. [1] [5]



Obr. 17 Řez ventilem pro řízení tlaku [5]

- |                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| 1 – elektrická přípojka | 6 – odtokový otvor   |
| 2 – tlačná pružina      | 7 – kulička ventilu  |
| 3 – cívka               | 8 – sedlo ventilu    |
| 4 – kotva               | 9 – přítok se sítkem |
| 5 – těsnící kroužek     |                      |

#### 4.2.5 VYSOKOTLAKÝ VSTŘIKOVACÍ VENTIL

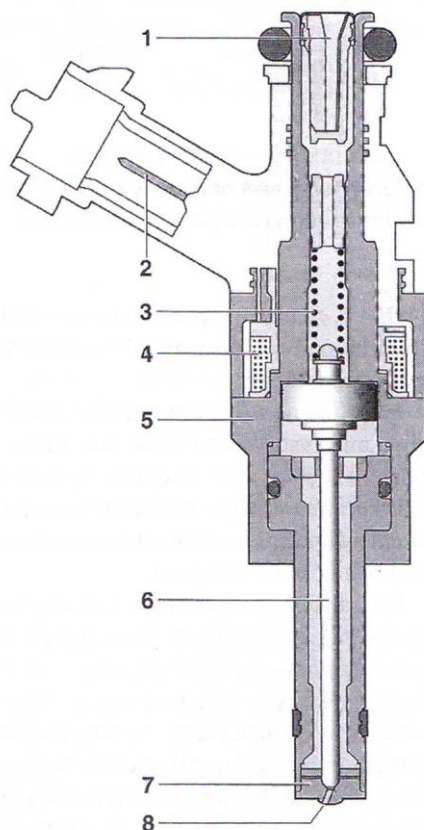
Vysokotlaký vstřikovací ventil představuje rozhraní mezi tlakovým zásobníkem a spalovacím prostorem. Úkolem vstřikovacího ventilu je dávkovat palivo a jeho rozprášením dosáhnout cíleného promísení paliva se vzduchem v určité oblasti spalovacího prostoru. Vstřikované množství paliva je závislé na tlaku v tlakovém zásobníku proti tlaku ve spalovacím prostoru a době otevření ventilu. Vhodnou geometrií trysky na hrotu ventilu lze dosáhnout velmi dobrého rozprášení paliva. [5]

Na rozdíl od nepřímého vstřikování je palivo při přímém vstřiku vstřikováno rychleji, přesněji a s lepší tvorbou paprsku. Podstatným rozdílem je vyšší tlak paliva a podstatně kratší čas, který je k dispozici k dopravení paliva do spalovacího prostoru. Maximální možná doba vstřiku při 6000 otáčkách za minutu je pouze 5 ms a při volnoběhu je doba vstřiku přibližně 0,4 ms, aby se dosáhlo co nejnižší spotřeby paliva. [5]

#### ELEKTROMAGNETICKÝ VSTŘIKOVACÍ VENTIL

Elektromagneticky ovládaný vstřikovací ventil se skládá ze sedla ventilu (7), jehly trysky s kotvou (6), pružiny (3) a cívky (4). Proud procházející cívkou (4) vytváří magnetické pole.

Jehla ventilu (6) je zvedána proti síle pružiny (3) ze sedla ventilu (7) a uvolňuje výstupní otvor ventilu (8). Při přerušení proudu je jehla ventilu silou pružiny (3) zatlačena do sedla ventilu (7) a průtok paliva je přerušen. [5]



Obr. 18 Elektromagneticky ovládaný vstřikovací ventil [5]

- |                            |                            |
|----------------------------|----------------------------|
| 1 – přítok s jemným sítkem | 5 – pouzdro                |
| 2 – elektrická přípojka    | 6 – jehla trysky s kotvou  |
| 3 – pružina                | 7 – sedlo ventilu          |
| 4 – cívka                  | 8 – výstupní otvor ventilu |

### PIEZOELEKTRICKÝ VSTŘIKOVACÍ VENTIL

Piezoelektricky ovládané vstřikovací ventily, použité u druhé generace přímého vstřikování, se vyznačují maximálně krátkými spínacími dobami, a umožňují tak vysoce flexibilní strategie vstřikování, vedoucí k optimálnímu využití potenciálů spotřeby paliva a škodlivých emisí. Ve vrstveném provozu je možné vytvořit vícenásobné, velmi úzce časově propojené vstřiky. Tím lze oblast efektivního vrstveného provozu rozšířit pro vyšší zatížení. [5]

Činnost piezoelektrických vstřikovacích ventilů je podobná jako u elektromagnetických vstřikovačů, s tím rozdílem, že obsahují piezoelement. Dilatace jednoho keramického krystalu

je ovšem extrémně malá, proto celý piezoelement obsahuje alespoň 400 takových krystalů naskládaných na sobě, aby byl zajištěn rozumný zdvih jehly trysky. Aktivace probíhá elektrickým impulsem o velikosti alespoň 100 voltů. [12]



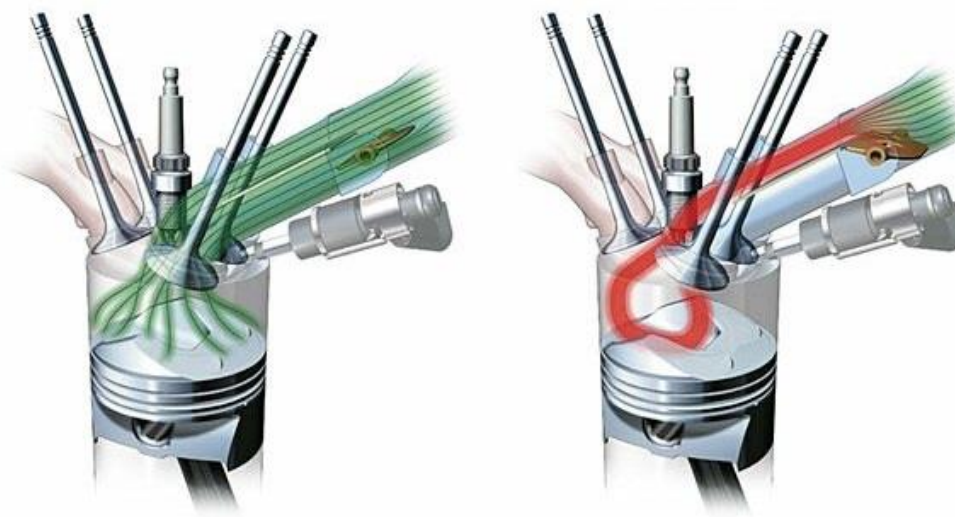
*Obr. 19 Piezoelektricky ovládaný vstřikovací ventil [12]*

## 5 KONCEPTY AUTOMOBILOVÝCH VÝROBCŮ

### 5.1 FSI

FSI (Fuel Stratified Injection) je systém přímého vstřikování benzínu vyvinutý firmou Volkswagen. Poprvé byl použit v roce 2000 u Volkswagenu Lupo. Pokud k tomuto systému přidáme turbodmychadlo, dostaneme název TFSI (Turbo Fuel Stratified Injection). [12]

Motor může pracovat jak v homogenním režimu (obr. 20 vlevo), tak v režimu vrstveného spalování (obr. 20 vpravo). Při vyšším zatížení pracuje motor v homogenním režimu, kdy je klapka v sacím potrubí plně otevřená a umožňuje tak nasátí maximálního množství vzduchu. V režimu vrstveného spalování je klapka přivřená a urychluje nasávaný proud vzduchu do válce, kde se podél stěn a tvarovanou prohlubní v pístu dostane až k zapalovací svíčke. [15]



Obr. 20 Pracovní režimy systému FSI [16]

### 5.2 TSI

TSI označuje přeplňované benzínové motory s přímým vstřikem paliva. Používají se prakticky u všech značek koncernu Volkswagen. První motor s označením TSI (Twincharged Stratified Injection) byl již v roce 2005 motor 1.4 TSI. Tento zážehový agregát s přímým vstřikem paliva byl zajímavý především dvojitým přeplňováním. Motor byl totiž vybaven do série zapojeným turbodmychadlem a Rootsovým kompresorem. Díky tomuto dvojitému přeplňování dosahoval motor výkonů srovnatelných s motory 2,3 litru. Přičemž spotřeba byla nižší zhruba o 20 %. [17]

Od roku 2008 se v nabídce objevily motory se stejným označením TSI (Turbocharged Stratified Injection), ale s jinou konstrukcí. Tato generace motorů již neměla dvojitě přeplňování, ale pouze jedno turbodmychadlo. Toto malé turbodmychadlo s elektricky řízeným obtokem rychle reagovalo na pokyny řidiče, a motor táhnul již od nižších otáček. [17]

### 5.3 D-4

V roce 1998 přišla Toyota na trh se svým vlastním systémem přímého vstřikování benzínu nazvaným D-4. Systém zahrnoval speciálně tvarovaný píst, spirální sací potrubí s klapkou, která ještě dále kontrolovala proud vzduchu v tomto potrubí. To vše pracovalo se systémem proměnného časování ventilů VVT-i, aby se dosáhlo ještě větší účinnosti a menší spotřeby paliva. [18]

Toyota později vylepšila tento systém (D-4S) a ke vstřikovači ve válci přidala druhý vstřikovací ventil do sacího potrubí, aby se zabránilo tvorbě karbonových úsad na sedlech ventilů. [19]

### 5.4 SCC





Systém SCC (Saab Combustion Control) vyvinula automobilka Saab. Je založen na kombinaci přímého vstřikování benzínu, proměnného časování ventilů a proměnné elektrodové vzdálenosti zapalovací svíčky. Proměnné časování ventilů umožňuje, že při malém zatížení tvoří spalovací prostor až ze 70 % výfukové plyny a zbytek směs vzduchu s palivem. Elektrodová vzdálenost zapalovací svíčky se může pohybovat mezi 1 až 3,5 mm. Při malém zatížení jiskra přeskočí mezi střední a uzemňovací elektrodou zapalovací svíčky, které jsou od sebe vzdáleny 3,5 mm. Při velkém zatížení probíhá zážeh o něco později. Hustota spalovací směsi je v tuto chvíli už příliš velká na to, aby jiskra přeskočila na vzdálenost 3,5 mm, a proto uzemňovací elektrodu nahradí výstupek v pístu (obr. 21), který se může ke střední elektrodě zapalovací svíčky přiblížit až na vzdálenost 1 mm. [20]









*Obr. 21 Spalovací prostor systému SCC [21]*

## 6 PŘEHLED MOTORŮ S PŘÍMÝM VSTŘIKOVÁNÍM BENZÍNU

Tab. 2 Vybrané motory jednotlivých výrobců s přímým vstřikováním benzínu [22]

Výrobce	Motor	Výkon/otáčky [kW]/[min <sup>-1</sup> ]	Točivý moment/otáčky [Nm]/[min <sup>-1</sup> ]	Objem motoru [cm <sup>3</sup> ]	Počet válců
Audi					
	V10 plus 5,2 FSI	449/8250	560/6500	5204	10
	2,5 TFSI	294/5850 – 7000	480/1700 – 5850	2480	5
BMW					
	M850i	390/5500 – 6000	750/1800 – 4600	4395	8
	230i	185/5200	350/1450 – 4800	1998	4
Citroën					
	1,6 PureTech 180	133/5500	300/1900	1598	4
	1,2 PureTech 68	50/5750	106/2750	1199	3
Ford					
	5,0 Ti-VCT	331/7000	529/4600	4951	8
	1,5 EcoBoost	121/5500	242/1600 – 4000	1499	4
Honda					
	2,0 VTEC Turbo	235/6500	400/2500 – 4500	1996	4
	1,5 i-VTEC	96/6600	155/4600	1498	4
Hyundai					
	2,0 T-GDI 275	202/6000	353/1450 – 4700	1998	4
	1,0 T-GDI 120	88/6000	172/1500 – 4000	998	3
Mazda					
	2,5 Skyactiv-G	143/6000	258/4000	2488	4
	1,5 Skyactiv-G132	97/7000	152/4500	1496	4
Mercedes-Benz					
	AMG GT R	430/6250	700/1900 – 5500	3982	8
	AMG GLA 45	280/6000	475/2250 – 5000	1991	4

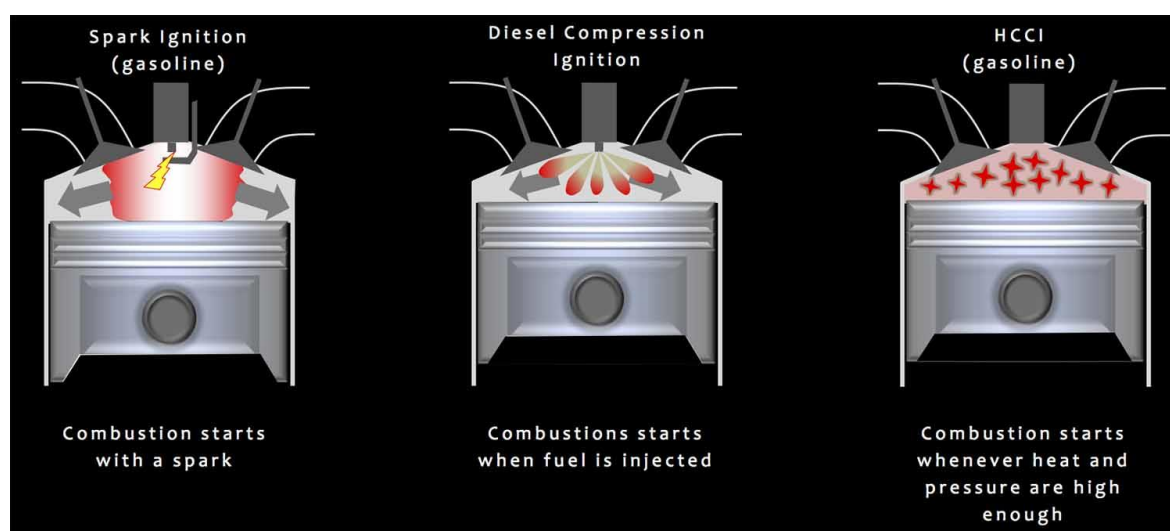
Nissan					
	3,7 V6	241/7000	363/5200	3696	6
	DIG-T 160	117/5500	260/1600	1332	4
Peugeot					
	1,6 PureTech 260	193/6000	340/2100	1598	4
	1,2 PureTech 110	81/5500	205/1750	1199	3
Renault					
	1,8 TCe 280	205/6000	390/2400 – 4800	1798	4
	1,4 TCe 160 GPF	117/5500	260/1750	1332	4
Subaru					
	2,5T	221/6000	407/4000	2457	4
	1,6GT-S	125/4800 – 5600	250/1800 – 4800	1600	4
Škoda					
	2,0 TSI	180/5000 – 6700	370/1600 – 4300	1984	4
	1,0 TSI	85/5000 – 5500	200/2000 – 3500	999	3
Volkswagen					
	2,0 TSI	228/5500 – 6200	380/1800 – 5000	1984	4
	1,5 TSI	96/4750 – 5500	200/1300 – 4500	1498	4

## 7 BUDOUCNOST PŘÍMÉHO VSTŘIKOVÁNÍ BENZÍNU

### 7.1 HCCI

HCCI (Homogenous Charge Compression Ignition) je spalovací motor, který kombinuje vlastnosti zážehových a vznětových motorů. HCCI nabízí stejnou účinnost spalování jako vznětové motory, velmi nízké emise  $\text{NO}_x$  a pevných částic a o 15 – 20 % nižší spotřebu paliva než zážehové motory. [23] [24]

Stejně jako u zážehových motorů se palivo vstříkne během sacího zdvihu, ale k zapálení směsi se nepoužije zapalovací svíčka. HCCI motor zvyšuje kompresí hustotu a teplotu směsi, až se veškerá náplň v podstatě vznítí současně. Nedojde tak k ohřátí neshořelé směsi právě shořelou, a tím ani nárůstu vrcholné teploty hoření, spíše naopak. [24]



Obr. 22 Ilustrace procesu spalování u zážehového motoru (vlevo), vznětového motoru (uprostřed) a HCCI motoru (vpravo) [25]

Aby ke vznícení směsi došlo v žádoucí okamžik polohy klikového hřídele při nejrůznějších podmínkách (mění se otáčky motoru, teplota paliva, teplota, tlak a vlhkost vzduchu, aj.), je třeba tomu přizpůsobit konečnou kompresi motoru. Ať už variabilní kompresí, nebo variabilním ovládním ventilů (které svým otevřením ovlivní jak množství nasávaného vzduchu, tak přísávání výfukových plynů i teplotu), případně obojím. K tomu musí být motor vybaven řadou senzorů a elektronikou, schopnou zpracovat údaje senzorů a dle nich řídit chod celého motoru. [24]

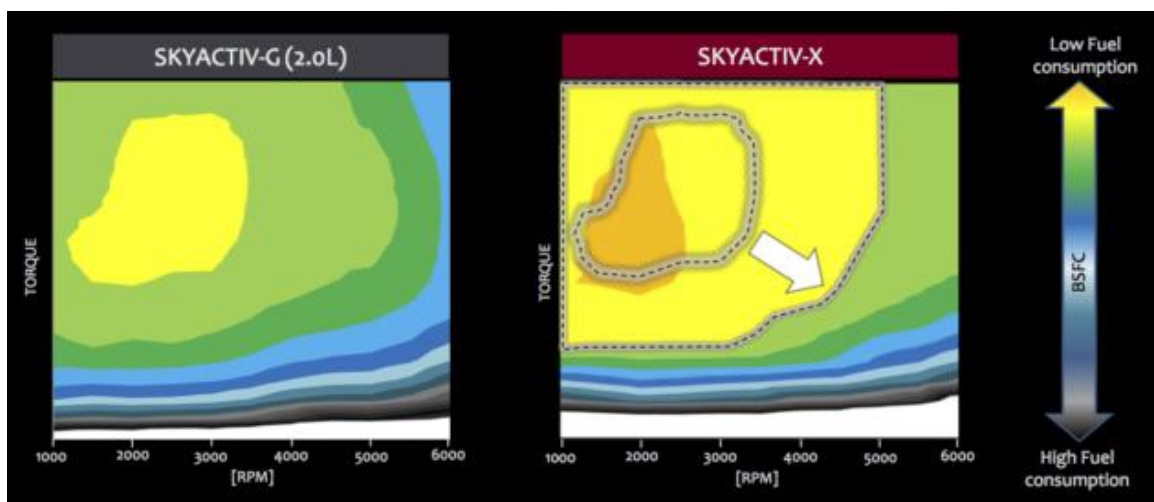
Vysoký kompresní poměr je zároveň i nevýhodou HCCI motorů. Vysoké tlaky ve válcích vyžadují odolnější (a dražší) konstrukci motoru. Další nevýhodou je, že HCCI motor je vhodný pouze pro úzké spektrum zatížení a otáček a příliš se nehodí pro plné zatížení. [23]

## 7.2 SPCCI (SKYACTIV-X)

Skyactiv-X je nová motorová řada automobilky Mazda využívající kompresního zapalování řízené svíčkou (SPCCI). Motor má pracovat s velmi chudou směsí (součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  až 2,5). Problémem je, že u velmi chudé směsi dochází ke špatnému hoření nebo nelze směs zapálit vůbec. Řešením je zvýšit kompresní poměr na velmi vysoké hodnoty. To však může způsobit klepání, které může vést k nenávratnému poškození motoru. [26]

Mazda zjistila, že zapalovací svíčka může mít stále své využití. Skyactiv-X byl navržen s kompresním poměrem 16:1 a pracuje s velmi chudou směsí. S těmito parametry by se měl motor nacházet těsně pod prahem samovznícení směsi. Zapalovací svíčka zažehne směs ve svém blízkém okolí a vlivem nárůstu tlaku a teploty se zbytek směsi, který je na hranici samovznícení, vznítí téměř současně v celém objemu. Mazda tento systém nazvala SPCCI (SPark Controlled Compression Ignition). [26]

Motor však vyžaduje použití dalších úprav a technologií bez kterých by nemohl být funkční. Směs paliva se vzduchem musí být v okolí zapalovací svíčky o něco bohatší, než ve zbylém objemu. To je dosaženo vířivým prouděním podél stěn, kde „klidná“ část směsi uprostřed válce obsahuje dostatečně bohatou směs pro zapálení pomocí svíčky. Aby se předešlo předčasnému samovznícení paliva, je v každém válci umístěn snímač tlaku, podle kterých řídicí jednotka upravuje časování zážehu zapalovacích svíček. Skyactiv-X používá i další komponenty, které ho odlišují od současné generace motorů Mazdy Skyactiv-G. Vstřikovací systém pracuje s tlaky, které se nachází někde mezi současnými zážehovými a vznětovými motory. Motor je také vybaven Rootsovým kompresorem, mezichladičem plnicího vzduchu chlazeným vodou, technologií recirkulací spalin (EGR) a elektricky ovládaným variabilním časováním ventilů pomocí krokových motorů pro rychlejší odezvu. [26]



Obr. 23 Nižší spotřeba (žlutá oblast) je dostupná v širším spektru otáček a zatížení [27]

Výsledkem je dvoulitrový čtyřválcový motor, který jede na klasický 95oktanový benzín. Oproti současné řadě Skyactiv-G se maximální točivý moment zvýší o 30 % a měl by mít minimálně o 20 % lepší spotřebu paliva. Ovšem hlavní výhodou je, že nižší spotřeba je dostupná v širším spektru otáček a zatížení (obr. 23). Proto mohou být převody o něco kratší pro lepší akceleraci při zachování stejné spotřeby paliva. Nová Mazda 3 má být osazena motorem Skyactiv-X a do prodeje by měla jít v druhé polovině roku 2019. [26]

## ZÁVĚR

Spalovací motor ještě neřekl své poslední slovo a je mnoho oblastí, ve kterých se dá stále vylepšovat. Přímé vstřikování a celkově tvorba směsi ve spalovacím prostoru je jednou z nich. Snaha výrobců zvyšovat účinnost zážehového motoru a snižovat jeho spotřebu je vidět na vývoji v posledních letech, kdy automobilky vyrábějí pohonné jednotky s čím dál menšími zdvihovými objemy (tzv. downsizing) a ve většině případů jsou osazeny minimálně jedním turbodmychadlem.

Přímý vstřik pomalu vytlačuje vstřik nepřímý, ale přináší s sebou i zásadní nevýhody, které výrobci musí řešit. Kromě dražší konstrukce celého palivového systému, nedostatečné rozprášení paliva způsobuje vznik pevných částic. Ty nejenže jsou přísně regulovány emisními normami, ale jsou také karcinogenní a mohou způsobovat vážné zdravotní problémy. Proto je dnes téměř povinností na zážehové motory montovat filtry pevných částic, které jsou velmi drahé. Řešením je neustále vylepšovat konstrukci vstřikovacích ventilů, zvyšovat vstřikovací tlaky a minimalizovat tak vznik těchto částic. Pevné částice se však při použití technologie recirkulace spalin mohou dostávat i zpět do sání a usazovat se v sacím potrubí a na sedlech sacích ventilů, což vede k postupnému snižování výkonu motoru a nákladnému čištění. Lze tomu zabránit spojením obou systémů vstřikování do jednoho motoru. Některé automobilky takové motory již nabízejí. Nízkou spotřebu a vysoký výkon zajišťuje hlavně přímý vstřik a nepřímý vstřik plní čistící funkci ventilů a sání.

Neustále se vyvíjející technologie, modernější elektronika a materiály umožní v budoucnu stále vylepšovat účinnost spalovacího motoru. Automobilky se budou zaměřovat hlavně na produkci škodlivých látek a snižování spotřeby paliva, kvůli zmenšujícím se zásobám ropy. Například Mazda stále věří v budoucnost spalovacího motoru a dokazuje to svou nejnovější koncepcí SPCCI. Proto bude ještě trvat minimálně desítky let, než spalovací motor plně nahradí elektrické, vodíkové, či jiné alternativní pohony.

## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Gasoline engine management: systems and components*, 2014. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-658-03963-9.
- [2] Gasoline Direct Injection, *Wikipedia* [online]. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline\\_direct\\_injection](https://en.wikipedia.org/wiki/Gasoline_direct_injection)
- [3] Mitsubishi Galant 1996, In: *MOMENTcar* [online]. [cit. 2018-11-16]. Dostupné z: <http://momentcar.com/image-modelYear/5534-mitsubishi-galant-1996-9.jpg.html#1>
- [4] GRINGER, Bonnie, Car Emissions: An Overview. *TitleMax* [online]. [cit. 2018-11-17]. Dostupné z: <https://www.titlemax.com/car-emissions-an-overview/>
- [5] HRMÁDKO, Jan, 2011. Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [6] FANG, Tiegang, Libing WANG a Zhi WANG, Particulate Matter Emissions from Gasoline Direct Injection Engines: Research Review. *Automotive Safety and Energy* [online]. August 2017, **8**(3), 228 [cit. 2018-11-21]. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2017.03.002. ISSN 1674-8484.
- [7] DUSIL, Tomáš, Přímé vs. nepřímé vstřikování benzínu: Modernější technologie nemusí být vždy lepší. *Auto.cz* [online]. 15. 5. 2018 [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/prime-neprime-vstrikovani-benzinu-modernejsi-technologie-121703>
- [8] DU, Zhuofei et al., Gasoline direct injection vehicles exceed port fuel injection ones in both primary aerosol emission and secondary aerosol formation. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. October 2017, **18**(12), 26 [cit. 2018-11-22]. DOI: 10.5194/acp-2017-776. ISSN 9011-9023.
- [9] SAJDL, Jan, Emisní norma EURO. *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2018-11-22]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>
- [10] STONE, Richard, 2012. *Introduction to internal combustion engines*. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan. ISBN 978-0-230-57663-6.
- [11] Electric Fuel Pump, *Automotive Diagnosis & Repair Information* [online]. [cit. 2019-02-16]. Dostupné z: [https://www.aalcar.com/library/fuel\\_pump.htm](https://www.aalcar.com/library/fuel_pump.htm)
- [12] Petrol Piezo Injector, *Autoditex* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://autoditex.com/page/petrol-piezo-injector-52-1.html>
- [13] Piezo Bosch Injector, In: *Autoditex* [online]. [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://autoditex.com/cms/user/files/PETROL%20PIEZO%20INJECTOR/Piezo-Bosch-Injector.png>
- [14] Fuel Stratified Injection, *Wikicars* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: [https://wikicars.org/en/Fuel\\_Stratified\\_Injection](https://wikicars.org/en/Fuel_Stratified_Injection)

- [15] WIESINGER, Johannes, Die Benzin Direkteinspritzung - FSI. *Kfztech.de* [online]. 30. 10. 2018 [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/otto/fsi.htm>
- [16] Audi FSI, In: *Kfztech.de* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <https://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/otto/fsi/fsiaudi.jpg>
- [17] SAJDL, Jan, TSI (Twincharged Stratified Injection). *Autolexicon.net* [online]. [cit. 2019-04-06]. Dostupné z: <http://www.autolexicon.net/cs/articles/tsi-twincharger-stratified-injection/>
- [18] Toyota Develops New D-4 Fuel Efficient, High Output Direct-Injection Gasoline Engine, *Toyota Motor Corporation Official Global Website* [online]. Aug. 05, 1996 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://global.toyota/en/detail/7901843>
- [19] SCHWEINSBERG, Christie, Toyota Advances D4S With Self-Cleaning Feature on Tacoma. *WardsAuto* [online]. Aug 27, 2015 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.wardsauto.com/technology/toyota-advances-d4s-self-cleaning-feature-tacoma>
- [20] The Saab Combustion Control System, *AutoSpeed* [online]. 12 December, 2000 [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <http://www.autospeed.com/cms/article.html?&A=0766>
- [21] SCC System, In: *AutoSpeed* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: [http://us1.webpublications.com.au/static/images/articles/i7/0766\\_7mg.jpg](http://us1.webpublications.com.au/static/images/articles/i7/0766_7mg.jpg)
- [22] Výrobci, *Autohled.cz - Porovnání a recenze aut* [online]. [cit. 2019-04-07]. Dostupné z: <https://www.autohled.cz/vyrobci>
- [23] GABLE, Christine a Scott GABLE, How Homogeneous Charge Compression Ignition Works. *ThoughtCo.* [online]. July 29, 2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/hcci-homogeneous-charge-compression-ignition-85588>
- [24] Vznětový motor s homogenním naplněním spalovacího prostoru, *Wikiwand* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: [http://www.wikiwand.com/cs/Vzn%C4%9Btov%C3%BD\\_motor\\_s\\_homogenn%C3%ADm\\_napl%C4%9Bn%C3%ADm\\_spalovac%C3%ADho\\_prostoru](http://www.wikiwand.com/cs/Vzn%C4%9Btov%C3%BD_motor_s_homogenn%C3%ADm_napl%C4%9Bn%C3%ADm_spalovac%C3%ADho_prostoru)
- [25] Illustration of the combustion characteristics, In: *Ars Technica* [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://cdn.arstechnica.net/wp-content/uploads/2018/01/FINAL-Tech-Forum-2018-Presentation-PDF-version-dragged.png>
- [26] GITLIN, Jonathan M., Compression ignition engines are a big breakthrough—we got to try one. *Ars Technica* [online]. 1/25/2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://arstechnica.com/cars/2018/01/mazdas-skyactiv-x-shows-the-internal-combustion-engine-has-a-future/>
- [27] A wider range of fuel economy, In: *Ars Technica* [online]. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <https://cdn.arstechnica.net/wp-content/uploads/2018/01/FINAL-Tech-Forum-2018-Presentation-PDF-version-dragged-12-1440x810.png>

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

AMC	American Motors Corporation
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
EGR	Exhaust Gas Recirculation
FPI	Fuel Port Injection
FSI	Fuel Stratified Injection
GDI	Gasoline Direct Injection
GPF	Gasoline Particulate Filter
H <sub>2</sub> O	Voda
HC	Uhlovodík
HCCI	Homogenous Charge Compression Ignition
HDP	Hochdruckpumpe
N <sub>2</sub>	Dusík
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku
PM	Pevné částice
SCC	Saab Combustion Control
SPCCI	Spark Controlled Compression Ignition
TCe	Turbo Control Efficiency
TFSI	Turbo Fuel Stratified Injection
Ti-VCT	Twin Independent Variable Camshaft Timing
TSI	Turbocharged Stratified Injection
TSI	Twincharged Stratified Injection
VTEC	Variable Valve Timing & Lift Electronic Control
VVT-i	Variable Valve Timing with intelligence
$\lambda$	[ - ] Součinitel přebytku vzduchu