

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

SYSTÉMY PŘÍMÉHO VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA U ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ

DIRECT INJECTION SYSTEMS FOR SPARK-IGNITION ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÁCLAV VONDRÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. LUBOMÍR DRÁPAL

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Václav Vondráček

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Stavba strojů a zařízení (2302R016)**

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:

Systémy přímého vstřikování paliva u zážehových motorů

v anglickém jazyce:

Direct injection systems for spark-ignition engines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Porovnání různých koncepcí přímého vstřikování paliva do spalovacího prostoru zážehových motorů, jejich zhodnocení a další perspektivy.

Cíle bakalářské práce:

Popište funkci systému, jeho komponenty a princip činnosti. Stručně uveďte historii použitých variant systému. Rozeberte současně používané koncepce, vzájemně je porovnejte a nastiňte možný budoucí vývoj v této oblasti.

Seznam odborné literatury:

- [1] VLK, F. Elektronické systémy motorových vozidel. František Vlk, 2002. ISBN 8023872826
- [2] ZHAO, F., HARRINGTON, D., LAI, M. Automotive Gasoline Direct-Injection Engines. SAE International, 2002. ISBN 978-0-7680-0882-1
- [3] MTZ: MOTORTECHNISCHE ZEITSCHRIFT. Springer Automotive Media.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lubomír Drápal

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 21.10.2008

L.S.

prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá přímým vstřikováním paliva u zážehových motorů. V jednotlivých kapitolách se dozvíme o principu činnosti vstřikování paliva, seznámíme se s jednotlivými základními částmi a komponenty a dozvíme se, jak tyto komponenty fungují. Dále tato práce porovnává konstrukční odlišnosti systémů některých automobilových výrobců a sleduje současný trend v této problematice s odkazem na budoucnost.

Klíčová slova: Zážehový motor, přímý vstřík, benzín

Abstract

This bacheleor's thesis deals with direct injection of fuel spark-ignition motors. In each chapter you can learn about principle activities injection of fuel, meet single parts and components and learn how these components work. Further, this work compare some constructional differencies of the systems of some automobile producers and observes contemporary general way of those problems with reference to future.

Key words: Spark - ignition engine, direct injection, petrol

Bibliografická citace mé práce:

VONDRÁČEK, V. *Systémy přímého vstřikování paliva u zážehových motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lubomír Drápal.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce pana Ing. Lubomíra Drápala, s použitím uvedené doporučené literatury.

V Brně dne

.....

Václav Vondráček

Poděkování

Za ochotnou podporu, názory a cenné připomínky, které mi byly při tvorbě této bakalářské práce užitečné, tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Lubomíru Drápalovi.

Obsah

1. Historie palivové soustavy s přímým vstřikováním benzínu	1
2. Úvod	2
3. Popis principu a funkce systému	3
3.1 Základní popis principu a funkce systému	3
3.2 Způsob tvorby vrstvené směsi	5
4. Popis funkce systému Bosch MED 7 (FSI) a jeho komponent	5
4.1 Schéma systému přímého vstřikování Bosch Motronic MED7	6
4.2 Popis jednotlivých částí a komponentů	7
4.2.1 Řídicí systém.....	7
4.2.2 Palivový systém, doprava a vstřikování paliva.....	8
4.2.2.1 Nízkotlaký okruh	8
4.2.2.2 Vysokotlaký okruh	9
4.3 Spalovací prostor a sání	12
4.4 Provozní režimy	13
4.5 Vlastní průběh vstřikování paliva	14
5. Porovnání dalších systémů přímého vstřikování paliva	16
5.1 Systém vstřikování GDI	16
5.2 Systém vstřikování Toyota D-4	20
5.3 Systém vstřikování Saab SCC	24
5.4 Porovnání způsobu tvorby zápalné směsi jednotlivými výrobci	28
6. Modernější systémy přímého vstřikování, budoucnost.....	28
6.1 Druhá generace přímého vstřikování Bosch DI-Motronic	29
6.2 Systém vstřikování Siemens -VDO PDI.....	32
7. Porovnání základních parametrů motorů	33
7.1 Se vstřikováním paliva do sacího potrubí.....	33
7.2 S přímým vstřikováním paliva.....	34
7.3 S přímým vstřikováním paliva a přeplňováním.....	35
Závěr.....	36
Seznam použitých zdrojů	37
Seznam použitých zkratk a symbolů	40
Přílohy	41

1. Historie palivové soustavy s přímým vstřikováním benzínu

Palivové soustavy zážehových motorů a způsob dopravy paliva do spalovacího prostoru rozeznáváme v několika provedení. Od karburátorů přes nepřímé jednobodové vstřikování paliva (SPI – **S**ingle **P**oint **I**njection) a nepřímé vícebodové vstřikování paliva (MPI – **M**ulti **P**oint **I**njection), po v poslední době nejvíce prosazovaný systém přímého vstřikování benzínu do spalovacího prostoru válců motoru.

První pokusy systému s přímým vstřikováním benzínu se začaly provádět již koncem třicátých let 20. století u vysoce výkonných leteckých motorů, které předznamenaly pozdější vývoj pro použití v automobilových motorech. Ty se poprvé objevily v 50. letech minulého století. Tehdy se jednalo o dvoudobé motory, konstruované v německých firmách Gutbrod (dvouválcový motor, typové označení Superior 700 o zdvihovém objemu 663 cm³, udávaném výkonu 21,1 kW) a Goliath (dvouválcový motor, typové označení GP 700/900E o zdvihovém objemu 688/886 cm³, udávaném výkonu 21,3 kW a 29,4 kW viz příloha č.1). Výhodou těchto motorů byla například nižší spotřeba paliva. I přes mnoho výhod se vyskytly problémy, které odsunuly tento způsob tvoření směsi u běžných cestovních automobilů do pozadí. Jedním z tehdejších problémů byla i vysoká cena způsobená složitější konstrukcí některých součástí. Prvním sportovním vozem vybaveným tímto systémem vstřikování se stal v 60. letech Mercedes Benz 300 SL (příloha č.2). Systém DI (**D**irect **I**njection), vyvinutý firmou Mercedes Benz společně s firmou Bosch pro přímé vstřikování paliva u vznětových motorů, využila firma při vývoji a konstrukci přímého vstřikování paliva pro zážehový motor. Následoval v 70. letech Ford, který představil motor PROCO (**P**ROgrammed **C**ombushion) „naprogramované spalování směsi“ (příloha č.3), nápadně připomínající dnešní GDI.

V roce 1996 byl firmou Mitsubishi vyvinut první systém přímého vstřikování benzínu pro automobilové zážehové motory, využívající elektronické řízení motoru s použitím akčních členů a snímačů se zpětnou vazbou, označený zkratkou GDI (**G**asoline **D**irect **I**njection). Na japonském trhu byl tento motor montován do vozidel Mitsubishi Galant, do Evropy se poprvé dostal ve vozech Mitsubishi Carisma, kde ale museli technici Mitsubishi řešit problémy s emisemi oxidů dusíku (NO_x) a nižší účinností paliva. Problém spočíval v obsahu síry v palivu. Zatímco vhodný benzín bez síry byl k dispozici pouze v Japonsku, na evropském kontinentu dělala síra v palivu značné problémy. Ani zpětné vedení výfukových plynů EGR (**E**xhaust **G**as **R**ecirculation) nepomáhá dostatečně. Řešením byl až nový katalyzátor NO_x, jenž spolu s obvyklým trojcestným katalyzátorem dostatečně snižuje emise. Tento katalyzátor je, ale bohužel, citlivý na síru, která ho dokáže poměrně brzy poškodit.

Evropské automobilky rozvíjí tento systém převážně na základě vývoje firmy Bosch, která dopracovala systém přímého vstřikování na současnou špičku v evropském provedení. V roce 1999 jej poprvé předvedla na autosalonu ve Frankfurtu pod názvem BDE.

Dalšími systémy přímého vstřikování paliva, vyvinuté jednotlivými automobilovými výrobci, které se dnes často používají:

- BDE pro vozidla firmy Volkswagen označených (FSI – **F**uel **S**tratifed **I**njection) pod názvem „DI-Motronic MED 7“
- Přímé vstřikování (HPi – **H**igt **P**ressure **I**njection) firmy BMW ve spolupráci s firmou PSA Peugeot – Citroen
- Systém IDE francouzské firmy Renault
- Systém D4 japonské automobilky Toyota
- Přímé vstřikování Alfa Romeo (JTS - **J**et **T**hrust **S**toichiometric)
- Systém (SCC - **S**aab **C**ombustion **C**ontrol) švédské automobilky Saab

2. Úvod

V této bakalářské práci budou rozebrány systémy přímého vstřikování paliva do spalovacího prostoru válců u zážehových motorů osobních automobilů. Popíšeme si některé systémy přímého vstřikování a porovnáme různé koncepce jednotlivých výrobců. Probereme princip funkce těchto systémů a jejich komponentů. Zhodnotíme výhody a nevýhody přímého vstřikování paliva, nastíníme budoucí vývoj a úmysly konstruktérů těchto systémů.

K vývoji nových systémů vstřikování vede současný automobilový průmysl problematika týkající se především: snížení spotřeby paliv a snížení emisí ve výfukových plynech (jako celosvětový problém). Lze říci, že systémy přímého vstřikování paliva jsou konstrukčně srovnatelné se systémy vstřikujícími palivo do sacího potrubí, avšak oproti nim vykazují zvýšení výkonu, snížení spotřeby paliva o 5% až 40%, potažmo emisí CO₂ (emise CO jsou totiž přímo úměrné spotřebě paliva). Vztaheno na evropský jízdní cyklus, lze tak ušetřit až 30% paliva.

Dřívějšímu zavedení tohoto systému bránilo například omezení výkonu motoru v provozu s vrstvenou směsí nebo chybějící možnost katalytického zpracování emisí oxidů dusíku (NO_x) v režimech s velmi chudou směsí (vrstvenou). Tyto problémy byly odstraněny a přímé vstřikování získalo velmi dobré předpoklady pro široké využití v moderních zážehových motorech.

Od 1.1.2000 musely všechny osobní automobily v Evropské unii splňovat velmi tvrdé podmínky normy EURO III. Od stejného data byla v těchto zemích ukončena výroba a prodej olovnatých benzínů. V ČR je zavedeno ukončení prodeje od roku 2001. Současně byl stanoven limit pro obsah síry v palivu na 150 ppm (parts per milion).

Od 1.1.2006 vešla v platnost norma EURO IV, která ještě více zpřísňuje požadavky na obsah spalin ve výfukových plynech jak u zážehových, tak vznětových motorů. V nedaleké budoucnosti, přesněji od 1.9.2009, se zážehové motory dočkají dalšího zpřísnění v oblasti produkce uhlovodíků a NO_x o 25 %. Konkrétně jde o snížení nespálených uhlovodíků (HC)

ze 100 mg/km (EURO IV) na 75 mg/km (EURO V) a NO_x z 80 mg/km (EURO IV) na 60 mg/km (EURO V). Samostatný limit by měl být zaveden pro zážehové motory s přímým vstřikováním benzínu, které jsou schopny pracovat s chudou (vrstvenou) směsí.

Tabulka emisních norem. Veškeré údaje jsou uváděny v g/km

Název	Platnost	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	PM
Benzín						
Euro 1	od 1992	2,72	-	-	0.97	-
Euro 2	od 1996	2,2	-	-	0.5	-
Euro 3	od 2000	1,3	0.20	0.15	-	-
Euro 4	od 2005	1.0	0.10	0.08	-	-
Euro 5	od září 2009	1.0	0.075	0.06	-	0.005

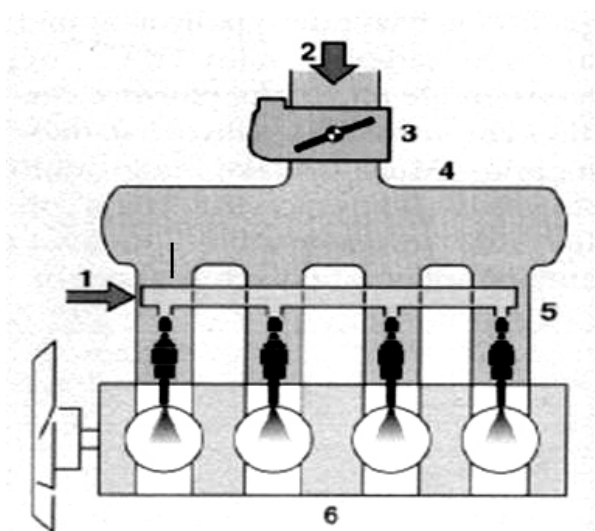
Jediná cesta, jak dosáhnout dodržení stanovených a uvažovaných limitů, je technicky dořešit systémy vstřikování a také katalyzátorů pro dodatečné zpracování oxidů uhlíku. Podmínkou je redukce obsahu síry v palivu. Systém přímého vstřikování je jedním z klíčových prvků, který se o dodržení těchto limitů zaslouhuje.

3. Popis principu a funkce systému

3.1 Základní popis principu a funkce systému

U systému s přímým vstřikováním je palivo vstřikováno v průběhu sacího a kompresního zdvihu přímo do náplně válce, tvořené čerstvým vzduchem, přičemž se rozprašuje a odpařuje ještě před zážehem jiskrou svíčky. Tyto systémy jsou vybaveny tlakovým zásobníkem, který umožňuje vstřikování paliva pod tlakem 20MPa a více. Přes elektromagnetický ventil je palivo ve správný okamžik vstřikováno do spalovacího prostoru, což u motorů pracujících s vrstvenou směsí pozitivně ovlivňuje energetickou ztrátu, která vzniká škrcením v sacím potrubí u motorů s nepřímým vstřikováním paliva. To se samozřejmě promítá do účinnosti motoru, která je zde vyšší než u motorů s nepřímým vstřikováním. Hmotnost nasávaného vzduchu je nastavitelná elektronickou škrticí klapkou (EGAS) a jeho přesné měření zajišťuje hmotnostní snímač s vyhřívaným filmem. Velmi lákavá je nabízená možnost pracovat při částečném zatížení motoru s velmi chudou směsí, přinášející další žádoucí úsporu paliva. Spalování chudé směsi však není tak jednoduché, jak se na první pohled zdá. V okamžiku zážehu musí být vytvořena v oblasti zapalovací svíčky směs takového složení, která je ještě schopna zažehnutí. Znamená to zajistit vhodné uspořádání spalovacího prostoru, správně umístit vstřikovací ventil, vyvinout speciální zapalovací svíčky a vytvořit optimální tvar sacího kanálu. Například firma Bosch vyvinula speciální klapku (tumble), která dělí sací kanál na dvě části – spodní a vrchní polovinu. Účelem této klapky je vytvářet, při sacím zdvihu pístu, požadované víření nasávaného vzduchu, umožňující rozdílnou bohatost směsi. Velmi důležité je také přesné stanovení časových hodnot vstřikování v řídicí jednotce, které je daleko přesnější a kratší než u nepřímého vstřikování. Při provozu motoru s homogenní směsí, například při 6000 otáčkách za minutu, je doba vstřiku přibližně 5 milisekund, což odpovídá zhruba jedné čtvrtině doby vstřiku u motorů s nepřímým vstřikováním, jenž se

udává kolem 20 milisekund. Při chodu motoru v režimu s vrstvenou směsí, tedy v oblasti částečného zatížení, popřípadě při volnoběžném chodu, jsou doby vstřikování od 0,4 milisekund. Palivo je vstřikováno v závislosti na požadovaném provozním režimu motoru, rozdílu tlaků v zásobníku paliva, spalovacím prostoru a na požadovaném druhu přípravy směsi. Průměr kapének vstřikovaného paliva je zhruba pětínový ve srovnání s palivem vstřikovaným do sacího potrubí. Kontrola složení směsi je zabezpečena dvěma lambda sondami umístěnými před a za katalyzátorem (většinou trojcestným). Ty slouží k regulaci provozu s homogenní (bohatou) směsí se součinitelem přebytku vzduchu $\lambda = 1$, což znamená stechiometricky přesné spalování v poměru 14,7:1 (bez přebytku vzduchu), nebo $\lambda < 1$ např. 0,8, nebo provozu s vrstvenou směsí (chudou), kdy je součinitel přebytku vzduchu $\lambda = 1,5$ až 3,0. Součinitel přebytku vzduchu je bezrozměrná veličina vyjadřující poměr mezi množstvím vzduchu skutečně přivedeného do spalovacího prostoru a teoretickým množstvím vzduchu, které je potřeba pro ideální průběh spalování. Stechiometrický poměr udává potřebné množství vzduchu motorem nasáté k potřebnému množství dodávaného paliva, přičemž jsou obě složky udávány v kilogramech (například ideální stechiometrický poměr 14,7 kg vzduchu / 1 kg paliva).



- 1 - palivo
- 2 - vzduch
- 3 – elektronická škrticí klapka (EGAS)
- 4 - sací potrubí
- 5 - vstřikovací ventily
- 6 - motor

Obr. 1 Obecné schéma přímého vstřikování benzínu [1]

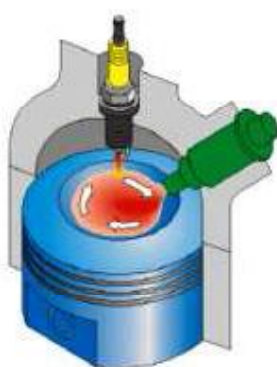
Velké množství proměnlivých řídicích veličin klade ve všech provozních podmínkách na vstřikovací systém velmi vysoké nároky. Mezi požadavky, které jsou na systém řízení motoru kladeny, patří zejména:

- velmi přesné odměření potřebného množství paliva
- vyvinutí potřebného tlaku paliva
- určení potřebného vstřikovacího tlaku
- určení správného okamžiku vstřiku paliva
- doprava paliva přímo a přesně do spalovacího prostoru motoru.

3.2 Způsob tvorby vrstvené směsi



Obr. 2 Spalování řízené stěnou [27]



Obr. 3 Spalování řízené vírem vzduchu [27]



Obr. 4 Spalování řízené paprskem paliva [27]

Spalování řízené stěnou (obr.2) používá například automobilka Volkswagen v motorech se systémem vstřikování FSI (viz kapitola 4.2). Stěna pístu (deflektor) je navržena v závislosti na tvaru a sklonu sacího kanálu tak, aby usměrňovala proudění směsi k zapalovací svíčce. Toto usměrnění je důležité hlavně pro vytvoření vrstveného plnění v oblasti nízkého zatížení motoru.

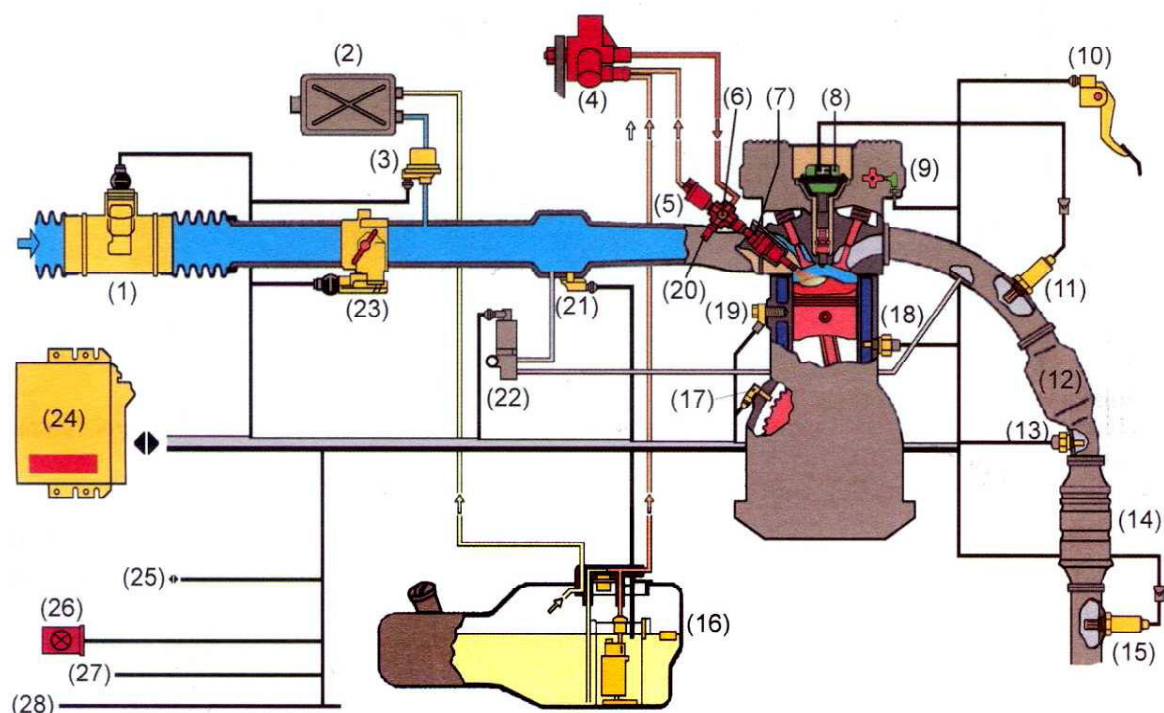
Spalování řízené vírem vzduchu (obr.3) používá například automobilka Toyota v motorech se systémem vstřikování D-4 (viz. kapitola 5.2). Tento systém je ale závislý také na tvaru spalovacího prostoru ve dně pístu, který má speciální tvar usměrňující proud nasáté směsi do optimální polohy pro zažehnutí zapalovací svíčkou.

Spalování řízené paprskem vstřikovaného paliva (obr.4) používá například druhá generace přímého vstřikování firmy Bosch nesoucí označení DI-Motronic (viz kapitola 6.1). Spalování řízené paprskem má oproti předchozí dvojici systémů výhodu, neboť dokáže zajistit vrstvené plnění do vyšších otáček motoru, než dojde k přepnutí na režim s homogenní směsí.

4. Popis funkce systému Bosch MED 7 (FSI) a jeho komponent

V této kapitole se dozvíme o systému přímého vstřikování Bosch MED 7, který byl firmou Volkswagen představen veřejnosti na podzim roku 1999 pod označením FSI (Fuel Stratified Injection), což je možno z hlediska významu přeložit jako „vstřikování s vrstvením paliva“. K tomuto systému vstřikování budou v následujících kapitolách přirovnávány ostatní systémy přímého vstřikování paliva s cílem poukázat na odlišnosti konstrukce různých výrobců. Jako první se tedy představíme motor o zdvihovém objemu 1390 cm^3 s rozvodem DOHC a čtyřmi ventily na válec firmy Volkswagen, který je používán v modelech Lupo, Polo a Golf. Motor dosahuje nejvyšší výkon $77 \text{ kW} / 6000 \text{ min}^{-1}$ a točivý moment $130 \text{ Nm} / 4250 \text{ min}^{-1}$.

4.1 Schéma systému přímého vstřikování Bosch Motronic MED7



Obr.5 Schéma systému vstřikování Bosch MED 7 (FSI) [4],
(zvětšené schéma viz příloha č.4)

1 – měřič hmotnosti nasávaného vzduchu, 2 – nádobka s aktivním uhlím, 3 – regenerační ventil nádobky s aktivním uhlím, 4 – vysokotlaké palivové čerpadlo, 5 – řídicí ventil tlaku paliva, 6 – zásobník paliva, 7 – vysokotlaký vstřikovací ventil, 8 – zapalovací cívka, 9 – snímač polohy a otáček vačkového hřídele, 10 – akcelerační pedál se snímačem polohy, 11 – kyslíková sonda (lambda-sonda), 12 – troj činný katalyzátor, 13 – snímač teploty výfukových plynů, 14 – zásobníkový katalyzátor NO_x, 15 - kyslíková sonda (lambda-sonda), 16 –palivová nádrž s dopravním palivovým čerpadlem, 17 – snímač polohy a otáček klikového hřídele, 18 – snímač teploty chladící kapaliny, 19 – snímač klepání motoru, 20 – snímač tlaku paliva, 21 –snímač podtlaku v sacím potrubí, 22 – elektromagnetický ventil recirkulace výfukových plynů, 23 – těleso škrťací klapky se snímačem natočení a zastavovačem škrťací klapky, 24 – elektronická řídicí jednotka, 25 – diagnostické rozhraní (konektor), 26 – kontrolka nesprávné funkce systému, 27 – imobilizér, 28 – datová sběrnice CAN

Na schematickém znázornění systému Motronic MED 7 (FSI) jsou žlutou barvou vyznačeny prvky, které technici firmy Bosch mohli převzít ze svého běžného výrobního programu. Červenou barvou jsou označeny prvky, které bylo třeba pro tento moderní typ přípravy směsi zážehových motorů speciálně vyvinout.

4.2 Popis jednotlivých částí a komponentů

4.2.1 Řídicí systém

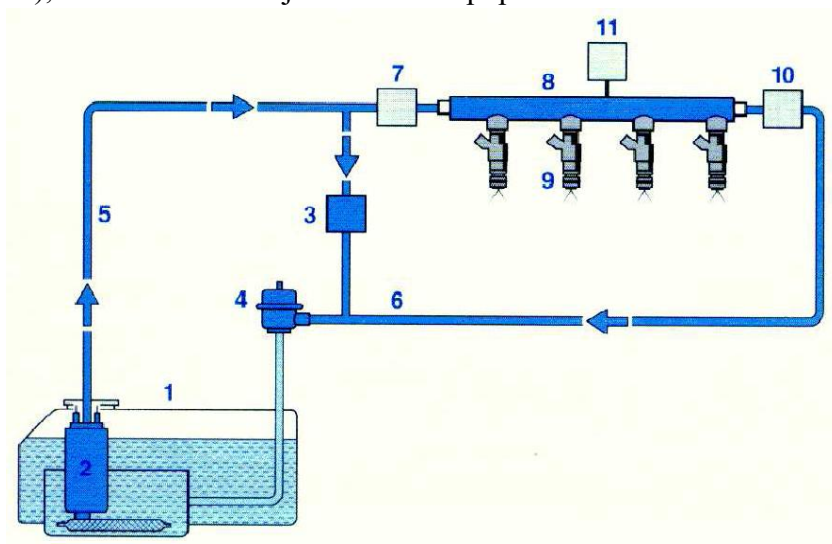
Systém řízení motoru Bosch Motronic MED 7 je první soustava nové generace přímého vstřikování paliva s elektronickou regulací v závislosti na točivém momentu motoru. Vysoce přesné odměření dávky paliva, vyvolání požadovaného vysokého tlaku pro vstřikování, vysoce přesné stanovení okamžiku vstřiku paliva do spalovacího prostoru a doprava paliva přímo a přesně do spalovacího prostoru, jsou základní požadavky kladené na řídicí systém pro přímé vstřikování paliva. Kromě toho musí soustava koordinovat různé požadavky na točivý moment motoru tak, aby byly co nejrychleji provedeny potřebné řídicí zásahy v motoru. Jak je vidět, největší nároky jsou tedy kladené na elektronickou řídicí jednotku (3), o které se dá říct, že je „mozkem“ celého systému. Veškerá provozní data a parametry motoru jsou jednotlivými snímači předávány do elektronické řídicí jednotky, datovou sběrnici nazývanou (CAN-Bus), kde jsou vyhodnoceny, a pomocí akčních členů se zpětnou vazbou je prováděno řízení motoru. Poloha pedálu akcelérátoru vyjadřuje základní požadavek na velikost točivého momentu. Tento požadavek dále může být doplněn ze systému řízení převodovky (GS), systému (ABS a ASR) nebo systému řízení dynamiky jízdy (FDR). Úprava požadavku na velikost točivého momentu je prováděna podle datového pole v řídicí jednotce motoru. Vysokotlaké systémy přímého vstřikování se zásobníkem paliva (5) mohou palivo vstřikovat v libovolném okamžiku vysokotlakými elektromagneticky otevíranými vstřikovacími ventily (7). Průtok nasávaného vzduchu je regulovaný elektronicky řízenou škrticí klapkou (EGAS). Přesné měření hmotnosti nasávaného vzduchu obstarává hmotnostní snímač s vyhřívaným filmem, ve kterém je umístěn i snímač teploty nasávaného vzduchu. Kontrola a složení směsi je prováděna dvěma lambda sondami (LSF a LSU) umístěnými před a za katalyzátorem. Další důležitou součástí je řízení zpětného vedení (recirkulace) spalin. Systém označený (EGR) plní funkci regulačního spínače základních hodnot tlaku v sacím potrubí.



Obr. 6 Vybrané hlavní části systému řízení motoru Bosch MED 7 [3]

4.2.2 Palivový systém, doprava a vstřikování paliva

Hlavní požadavky kladené na vstřikovací systém, okamžik vstřiku a proměnný systémový tlak, lze nejlépe splnit použitím systému vstřikování se zásobníkem paliva, jenž nabízí akumulací systém (common-rail). Ten umožňuje vstříknout palivo nashromážděné pod určitým tlakem v zásobníku elektromagneticky ovládaným vstřikovacím ventilem přímo do spalovacího prostoru. Palivový systém se dělí do dvou okruhů (nizkotlakého a vysokotlakého), které si v následujících krocích popíšeme.



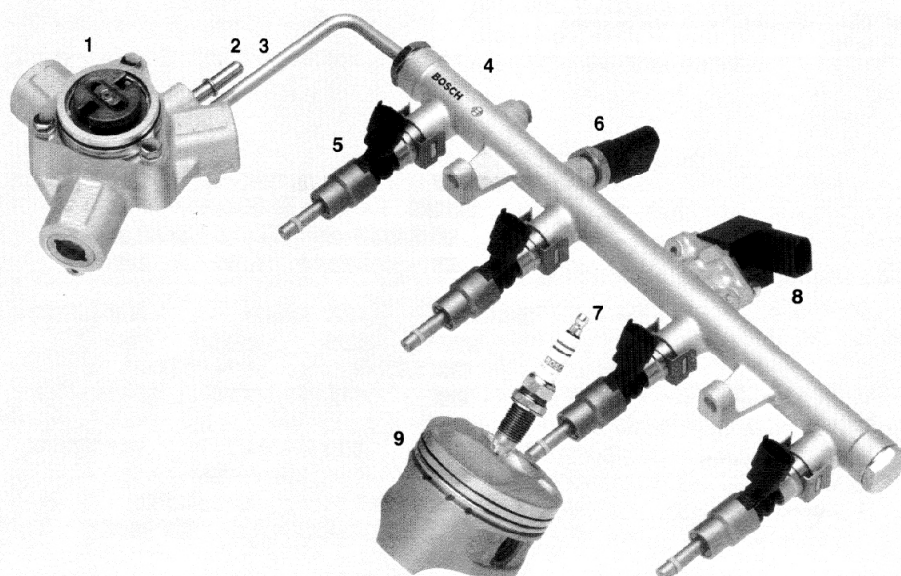
Obr. 7 Doprava paliva se zpětným vedením a přepínáním tlaku [6]

1 - palivová nádrž, 2 - podávací čerpadlo, 3 - elektromagnetický ventil, 4 - regulátor tlaku (0,3MPa), 5 - palivové potrubí, 6 - zpětné vedení paliva, 7 - vysokotlaké čerpadlo, 8 - tlakový zásobník, 9 – vstřikovací ventily, 10 - redukční ventil, 11 - snímač tlaku paliva

4.2.2.1 Nizkotlaký okruh

Části nizkotlakého okruhu jsou umístěny převážně v palivové nádrži (1), která se skládá z elektrického palivového čerpadla (2), paralelně připojeného mechanického regulátoru tlaku a z čističe paliva. Palivo je vedeno palivovým potrubím (5) do vysokotlakého čerpadla (7). Konstantní úroveň tlaku paliva na vstupu vysokotlakého čerpadla zabezpečuje regulátor tlaku (4). Tato úroveň je dvoustavová. Za normálního provozu je ventil (3) otevřen a regulátor (4) udržuje tlak na hodnotě 0.3 MPa. V případě, že teplota paliva na vstupu do vysokotlakého čerpadla je příliš vysoká, při startu teplého motoru a následném volnoběhu, je nutno zabránit vzniku parních bublin v tomto čerpadle. Řešením je zvýšení tlaku na hodnotu 0.5 MPa. Dosažen je tak, že ventil (3) je uzavřen a úroveň tlaku řídí redukční ventil čerpadla (2). Po 30 až 60 sekundách poklesne v důsledku průtoku paliva vysokotlakým čerpadlem teplota na bezpečnou úroveň a regulační ventil (3) se otevře. Vysokotlaké čerpadlo dodává palivo do tlakového zásobníku (8), odkud je vysokotlakými elektromagnetickými ventily (9) vstřikováno do válce motoru. Tlak v zásobníku je udržován na konstantní úrovni ventilem (10), který přebytečné palivo přepouští zpětným potrubím (6) do nádrže. Úroveň tlaku v zásobníku je snímána snímačem (11).

4.2.2.2 Vysokotlaký okruh

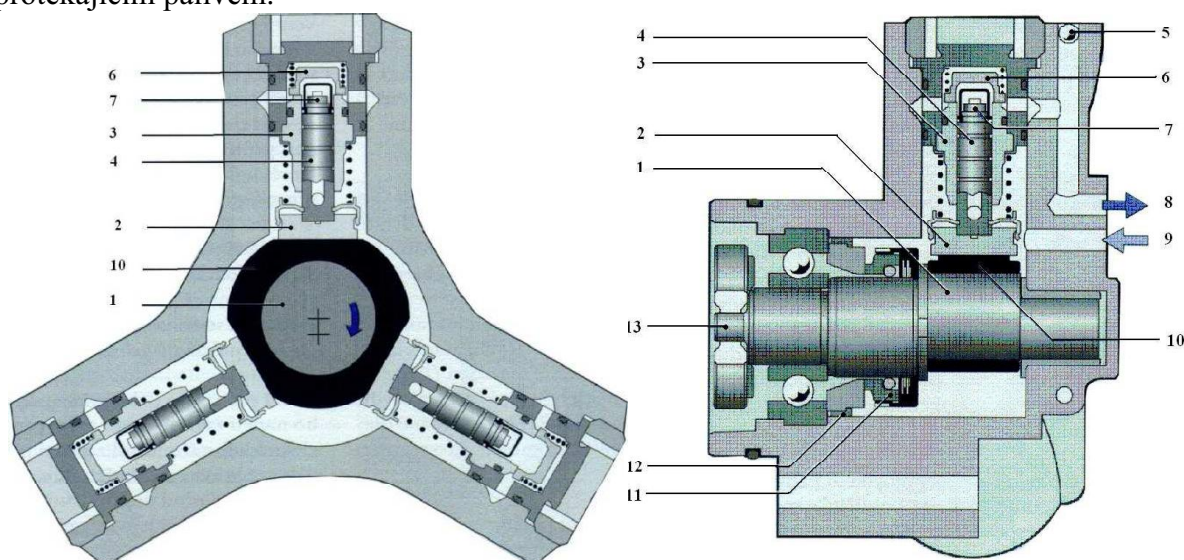


Obr. 8 Prvky vysokotlakého okruhu systému vstřikování FSI [5]

1 – vysokotlaké palivové čerpadlo, 2 – nátrubek přívodu paliva z nízkotlakého palivového okruhu, 3 – spojovací potrubí, 4 – tlakový zásobník paliva (Rail), 5 – vysokotlaké vstřikovací ventily, 6 – tlakový snímač paliva, 7 – zapalovací svíčka, 8 – řídicí ventil tlaku paliva, 9 – spalovací prostor,

Nátrubkem (2) je do vysokotlakého čerpadla (1) přiváděno palivo z nízkotlakého okruhu pod tlakem 0,3 až 0,5 MPa. Do tlakového zásobníku (4) je palivo z čerpadla přiváděno potrubím (3) pod tlakem 5 až 12 MPa. Potřebná úroveň tlaku je udržována na základě údajů snímače (6) elektronicky ovládaným ventilem (8). Palivo z tlakového zásobníku (Rail) je vedeno do vysokotlakých vstřikovacích ventilů (5) ústících do spalovacího prostoru (9).

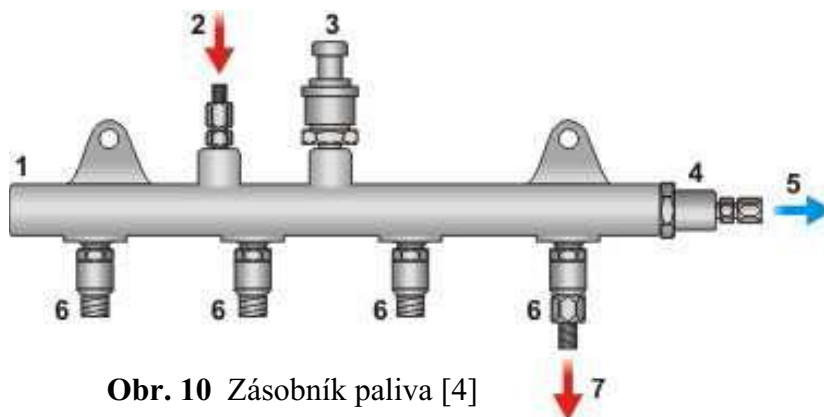
Pístové vysokotlaké palivové čerpadlo je poháněno mechanicky a jeho úkolem je zvýšit tlak paliva z 0,35 MPa až na 12 MPa. Použitím tří výtláčných pístků zajišťuje minimální kolísání tlaku paliva v zásobníku (snížení amplitudy tlakových pulzů). Čerpadlo je mazáno a chlazeno protékajícím palivem.



Obr. 9 Příčný a podélný řez vysokotlakým vstřikovacím čerpadlem BOSCH HDP1 se třemi vstřikovacími jednotkami [6], (zvětšené barevné schéma viz příloha č.5)

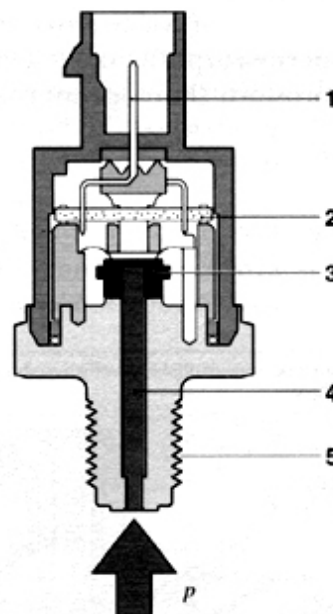
Palivo přiváděné z podávacího čerpadla vstupuje přívodním otvorem (9) do vnitřního prostoru vysokotlakého čerpadla. Pohybem dutého pístu (4) ve válci (3), směrem ke středu rotace čerpadla, se objem nad pístem zvětšuje, a palivo je přes ventil (7) dopravováno do tohoto objemu. V tomto okamžiku je výtlačný ventil (6) uzavřen. Pohybem pístu od středu rotace je palivo po otevření výtlačného ventilu (6) dopravováno přes výstupní otvory (8) do tlakového zásobníku. Pohyb pístu určuje poloha excentru (1), který působí přes kluzný kroužek (10) na kluzák (2). Axiální ucpávka (11) a těsnění (12) zabezpečuje utěsnění vnitřního prostoru čerpadla proti nežádoucímu úniku paliva.

Zásobník paliva svou pružností tlumí tlakové pulzace paliva, které jsou způsobeny nepravidelností jeho odběru a vlastním čerpadlem vysokého tlaku. Hodnota tlaku je kontrolována snímačem tlaku paliva (3). Zásobník musí být dostatečně tuhý a pružný, což vyplývá z požadavku vysoké stlačitelnosti paliva. Zásobník (1) současně slouží jako rozdělovací palivové potrubí, je vyroben z hliníkové slitiny, a má otvory pro připojení vstřikovacích ventilů (6), řídicího ventilu tlaku paliva (4) a přívodu (2) z vysokotlakého palivového čerpadla.



Obr. 10 Zásobník paliva [4]

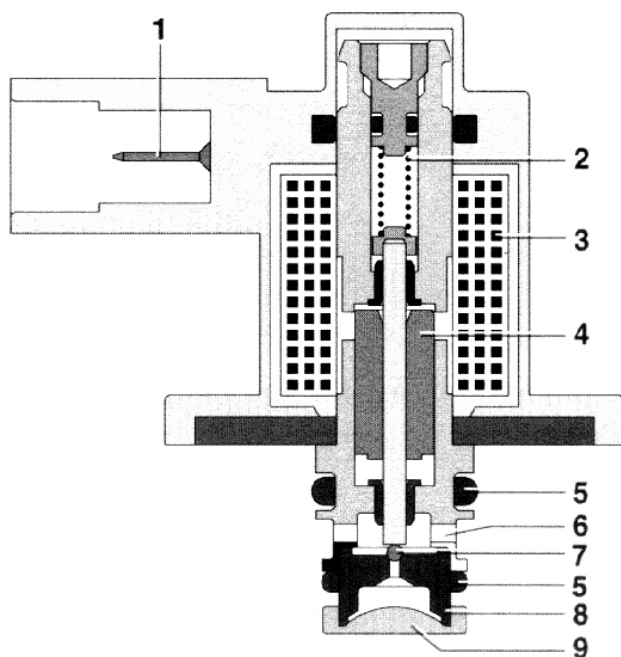
Snímač tlaku paliva měří hodnotu tlaku paliva v zásobníku. Jako čidlo je použita kovová nerezová membrána s rezistory nanesenými v tenké vrstvě. Působením tlaku (p), na ocelovou membránu (3), dojde k mírné deformaci, jež je sledována tenzometrickými snímači deformace. Elektronický obvod (2), jehož signál je vyveden na konektor (1), zajišťuje vyhodnocení signálu. Tlakový řídicí ventil je ovládán na základě údajů zmiňovaného snímače.



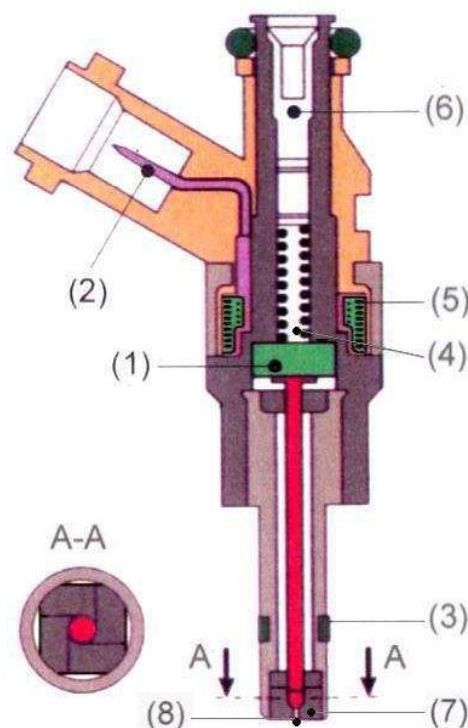
Obr. 11 Snímač tlaku paliva [6]

Tlakový řídicí ventil (obr.12) nastavuje systémový tlak paliva v celém rozsahu provozních režimů tak, aby odpovídal nastaveným hodnotám v datovém poli řídicí jednotky. Hodnota se pohybuje v rozsahu 5 až 12 MPa. Tlak se řídí v závislosti na velikosti tlaku, pod kterým je palivo vstřikováno do spalovacího prostoru válce motoru a na množství paliva dodávaného vysokotlakým čerpadlem. Přebytek paliva není veden zpět do nádrže, ale do sací části vysokotlakého čerpadla. Tím je zajištěno ohřátí paliva a odvzdušnění palivového zásobníku. Ovládání tlakového řídicího ventilu je prováděno elektrickými impulsy přiváděnými konektory (1). V cívce (3) se vytváří magnetické pole, které proti tlaku pružiny (2) vtahuje do cívky kotvu (4). Tím se otevře kuličkový ventil (7). Těsnícím „O“ kroužkem (5) protéká přes sítko (9) palivo z tlakového zásobníku do odtokového otvoru (6). Ventil je bez napětí uzavřen, a aby nedošlo k extrémnímu nárůstu tlaku v zásobníku, je pružina (2) navržena tak, aby umožnila při dosažení maximálního dovoleného tlaku samočinné otevření ventilu.

Vysokotlaký vstřikovací ventil (obr.13) zajišťuje rozprášení paliva ve válci motoru. Ventil je připojen přímo k vysokotlakému zásobníku paliva a jeho ovládání je prováděno elektromagneticky. Prostřednictvím řídicího napěťového signálu, přiváděného do cívky elektromagnetu (5) konektorem (2), je současně určen počátek vstřiku i doba otevření vstřikovacího ventilu. Přes jemné sítko je palivo přiváděno z tlakového zásobníku do prostoru nad sedlem jehly (7). Pružina (4) přitlačuje jehlu ventilu do sedla (7). Vstřikovacím otvorem (8) je palivo dopraveno do válce motoru, přičemž je jeho množství závislé na tlaku paliva v zásobníku, na velikosti tlaku ve spalovacím prostoru a na době otevření vstřikovacího ventilu. Doba, která je k dispozici pro vstřik paliva, je podstatně kratší v porovnání se systémy s nepřímým vstřikováním.



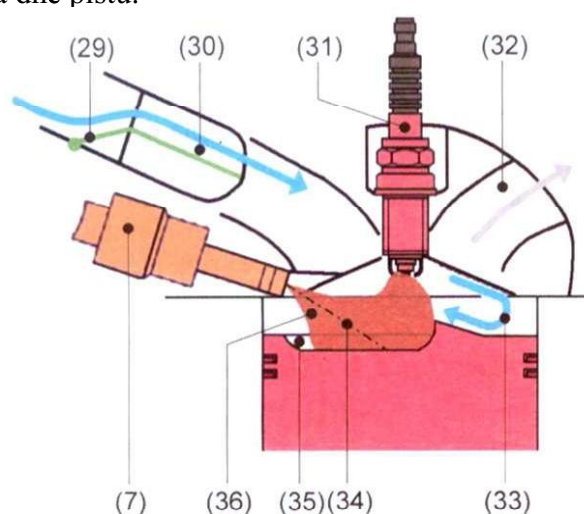
Obr. 12 Tlakový řídicí ventil [14]



Obr. 13 Vysokotlaký vstřikovací ventil [4]

4.3 Spalovací prostor a sání

Ve spalovacím prostoru je mezi sacími a výfukovými ventily umístěna zapalovací svíčka (31), po straně pod sacími kanály pak vysokotlaký vstřikovací ventil (7). Při částečném zatížení pracuje motor s velkým přebytkem vzduchu a vrstveným plněním. U vstřikování Bosch MED7 (FSI) je vrstveného plnění dosaženo systémem Tumble (příloha č.6). Sací kanál (30) je zdvojený s nastavitelnou „vířivou“ klapkou (tzv. Tumble – klapkou 29). Uzavřená klapka umožňuje proudění vzduchu jen v horní části sacího kanálu (30), čímž se ve spalovacím prostoru vyvolá intenzivní vertikální vír. Při plném zatížení je motor provozován v režimu s homogenní směsí, Tumble klapka (29) je otevřena, a vzduch je plným průtočným průřezem nasáván do spalovacího prostoru. Také tvar dna pístu má významnou roli při vrstveném plnění. Na obrázku 16 je viditelné, jakým způsobem je proud směsi směřován pomocí deflektoru na dně pístu.



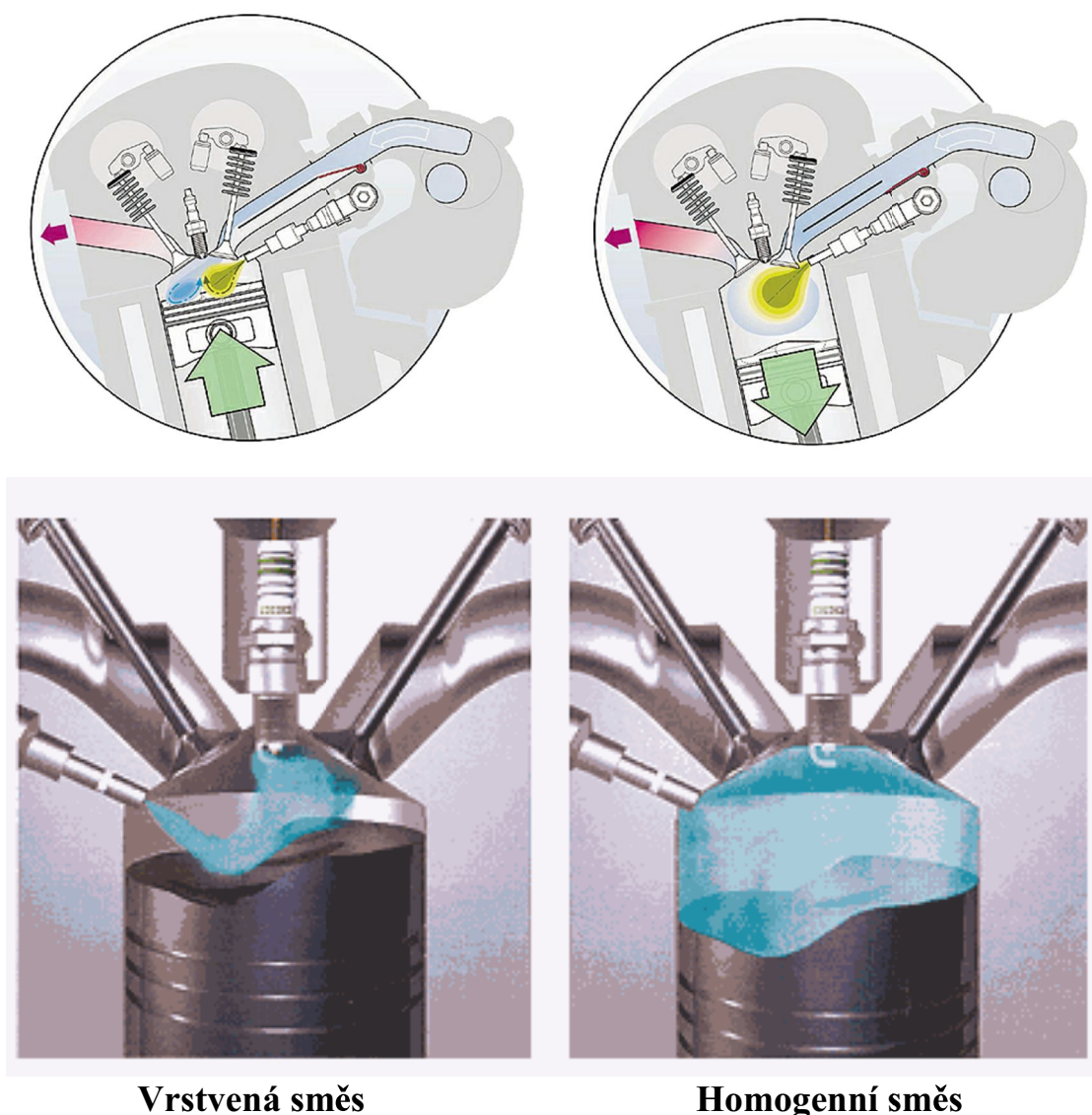
Obr. 14 Princip plnění u motoru VW FSI [4]
(provozní režim s vrstvenou směsí)



Obr. 15 Směs vrstvena deflektorem na dně pístu [13]

4.4 Provozní režimy

Při částečném zatížení je motor provozován v režimu s vrstvenou směsí. Směs se přivádí bezprostředně do prostoru zapalovací svíčky, vstřikování dalšího množství paliva následuje opožděně při zajištění dostatečného přebytku vzduchu. Prostory vzdálené od svíčky obsahují směs chudší. To vede k tomu, že přes stěny válce nedochází ke snížení teploty při spalování směsi – snížení tepelných ztrát. Vysoký podíl zbytkového vzduchu vede k účinnějšímu spalování při souběžně velkém otevření škrticí klapky a dochází i k minimálním ztrátám energie při vyplachování spalovacího prostoru. Při zvýšení zatížení motoru a nárůstu otáček je nutný přechod na spalování směsi homogenní. Ta umožňuje lepší vnitřní chlazení, neboť výparné teplo, nezbytné pro odpaření vstřikovaného paliva, je odebíráno komprimovanému vzduchu. Současně je snížena schopnost klepání motoru a je možné zvýšit i kompresní poměr motoru. Výsledkem je snížení spotřeby paliva. Palivo je rovnoměrně rozprášeno ve vstřikovacím paprsku, kterým je dosaženo rychlého a rovnoměrného spálení směsi.



Vrstvená směs

Homogenní směs

Obr. 16 Provozní režimy [3]

4.5 Vlastní průběh vstřikování paliva

Komplexní řízení motoru pomocí motormanagementu je pro dosažení snížení spotřeby a zachování výkonu. Vstřikování a tvorba směsi je prováděna ve třech rovinách:

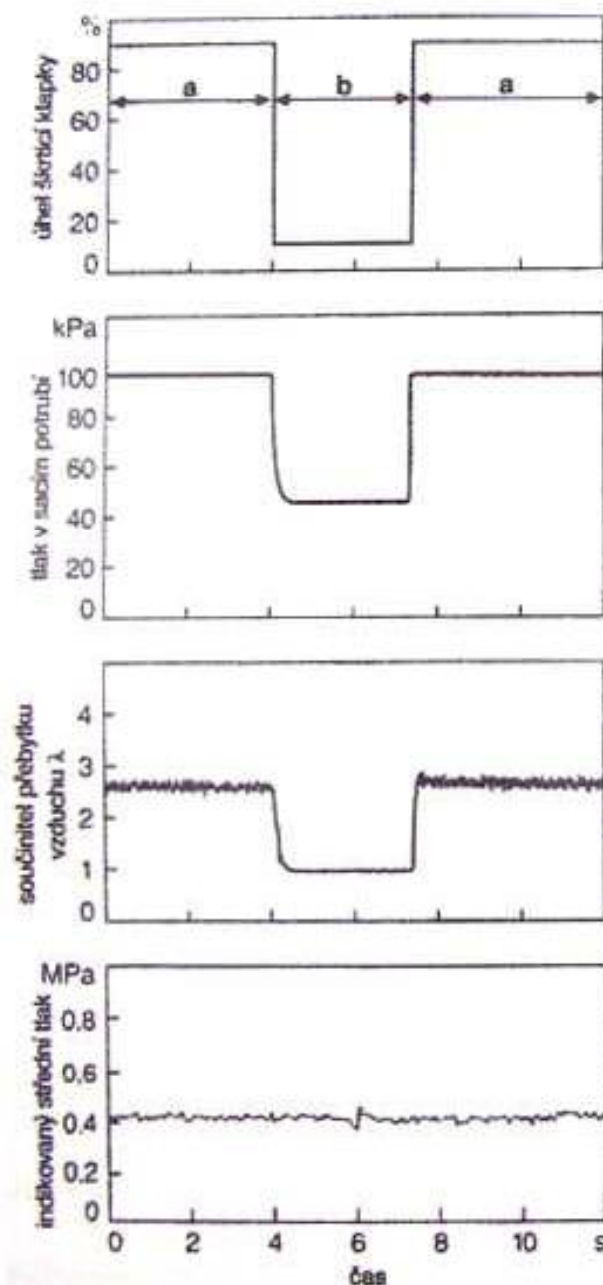
- dolní rozsah zatížení motoru
- horní rozsah zatížení motoru
- změny rozsahu zatížení

Dolní rozsah zatížení motoru – je charakteristický činností motoru s plněním vysoce vrstvenou směsí paliva a vzduchu (velký přebytek vzduchu), zpožděním okamžiku vstřiku paliva (těsně před zážehem) a točivý moment je úměrný vstřikovanému množství paliva.

Tyto podmínky umožňují rozdělení spalovacího prostoru do dvou částí. U zapalovací svíčky je vytvořen oblak směsi k okamžitému zážehnutí. Oblak zápalné směsi je hromaděn u zapalovací svíčky vlivem přebytku vzduchu a recirkulovaných výfukových plynů. Vlivem takto vrstvené směsi dochází k minimálním tepelným ztrátám na stěnách válce motoru. Motor je možné provozovat i bez škrcení a vyhneme se ztrátám vznikajícím plněním. Pro snížení emisí, hlavně NO, se intenzivně přivádí spaliny zpět do sání motoru (recirkulace palin).

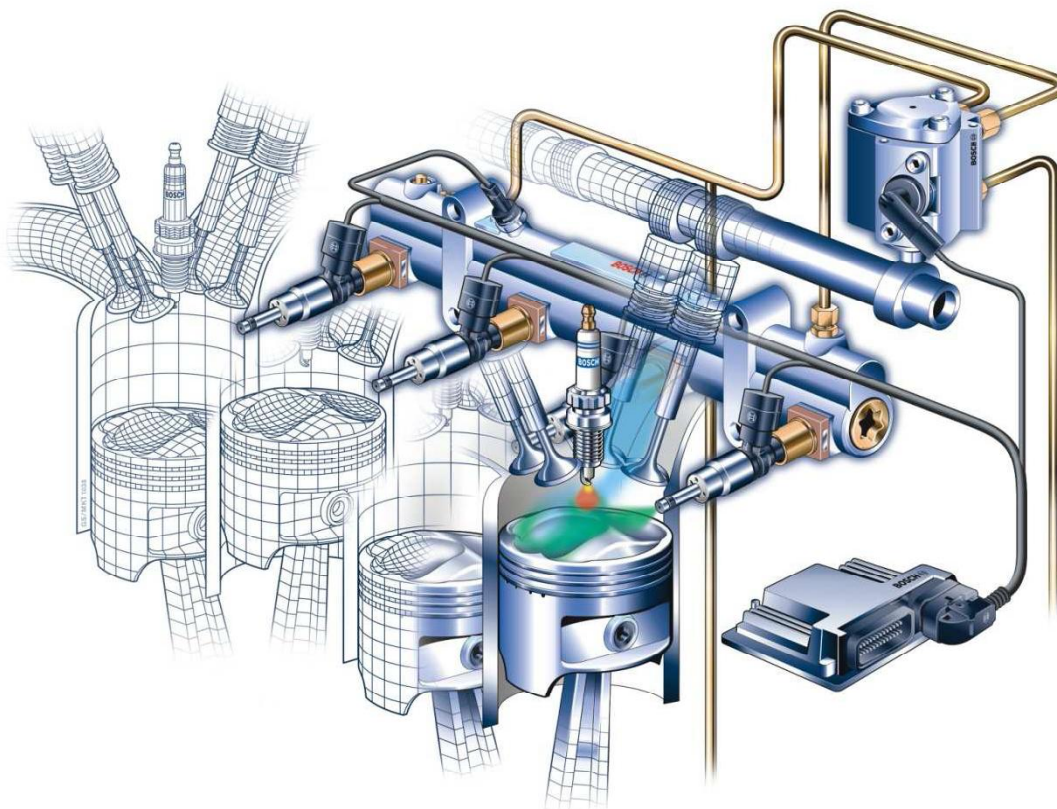
Horní rozsah zatížení motoru – se stoupajícím zatížením motoru a současným vzestupem množství vstřikovaného paliva se mění směšovací poměr, zhoršují se emise, hlavně pevných částic (sazí). Motor je provozován s homogenním plněním směsi paliva se vzduchem. Řízení lambda regulace je v oblasti $\lambda = 1$ a v oblasti bohaté směsi. Palivo je vstřikováno již v průběhu nasávání

vzduchu a tím dochází k jeho dokonalému promíchání. Motor je regulován kvalitativně, tzn. změnou složení směsi paliva se vzduchem. Množství paliva je vypočítáno z hmotnosti nasávaného vzduchu, regulovaného elektronicky řízenou škrticí klapkou, a upraveno lambda regulací.



Obr. 17 Postup přepnutí mezi provozem s vrstvenou a homogenní směsí: [3]
a) provoz s vrstvenou směsí
b) provoz s homogenní směsí

Změny rozsahu zatížení – pro zajištění chodu motoru ve všech možných provozních podmínkách je nutné, aby vstřikování a příprava směsi paliva se vzduchem splnila následující požadavky: Okamžik začátku vstřiku se musí měnit podle okamžitého zatížení motoru v obou možných režimech přípravy směsi (vrstvená, homogenní), tj. okamžik vstřiku v průběhu komprese a v průběhu sání. Rozhodující pro nastavení množství paliva, aby byl možný provoz s vrstvenou i homogenní směsí, je hmotnost nasávaného vzduchu a nastavení předstihu zážehu tak, aby byl výsledný točivý moment konstantní. S klesajícím tlakem v sání klesá hodnota součinitele přebytku vzduchu λ . Pro přepnutí jsou rozhodující mezní hodnoty: $\lambda = 1,5$ při provozu s vrstvenou směsí pro zamezení tvorby sazí a $\lambda = 1,3$ při provozu s homogenní směsí je omezená schopnost chodu motoru s chudou směsí paliva se vzduchem. Při přepnutí je potlačen stanovený „zakázaný rozsah“ $1,3 < \lambda < 1,5$ tím, že je v okamžiku přepnutí zvýšena dodávka vstřikovaného paliva jednorázově a díky krátkodobé změně předstihu nedojde ke skoku točivého momentu. Tím je přepínání mezi oběma režimy provozu plynulé. Dodatečné vyhodnocení spalin ve výfukových plynech obstarávají dvě λ sondy umístěné před a za katalyzátor. Pro použití těchto typů vstřikovacích systémů jsou důležité dvě technické podmínky, které zajišťují splnění podmínek provozu při snížení emisí spalin hlavně obsahu NO_x , který se intenzivně vyvíjí při spalování zvláště chudých směsí paliva a vzduchu. Jde zejména o snížení obsahu síry v palivu a nasazení nové katalyzátorové techniky (například: řízený zásobníkový trojcestný katalyzátor).



Obr. 18 Průběh vstřikování paliva u systému FSI [19] (příloha č. 9,10)

5. Porovnání dalších systémů přímého vstřikování paliva

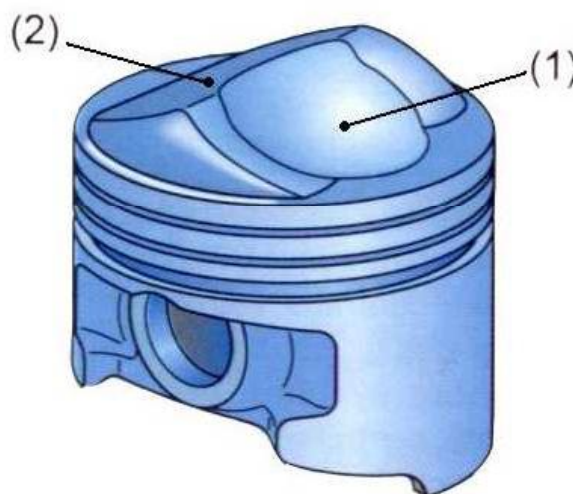
5.1 Systém vstřikování GDI

Systém přímého vstřikování benzínu GDI (**G**asoline **D**irect **I**njection), byl vyvinut firmou Mitsubishi. Technici a konstruktéři vyvíjeli motor plných patnáct let a při jeho konstrukci uplatnili 200 patentových konstrukčních řešení. První motor s označením GDI se poprvé objevil v sériové výrobě v roce 1996 v automobilu Mitsubishi Galant. V následujících krocích budou ukázány především rozdílnosti konstrukce systému GDI oproti systému Bosch MED 7 (FSI). Konstrukční prvky a parametry budou vycházet ze čtyřválcového motoru 1,8 GDI s rozvodem DOHC a čtyřmi ventily na válec, který disponuje výkonem 92 kW (125 k) při 5500 ot/min⁻¹ a točivým momentem 174 Nm při 3750 ot/min⁻¹. Řez motorem Mitsubishi (příloha č.13)

Hlavní konstrukční odlišností spalovacího prostoru a sání oproti systému vstřikování Bosch MED 7 (FSI), je především sací kanál, který je téměř svislý (vertikální) a není opatřen klapkou tumble (viz.FSI). Změna se týká také samotného směru proudění vzduchu a směsi ve válci, s čím také souvisí rozdílně tvarovaný deflektor (2) a vybrání dna pístu (1), znázorněné na obrázku 20. Svislá poloha sacího kanálu a účelně tvarované dno pístu určuje rozdílný směr víření vzduchu a směsi oproti koncepci FSI. Na rozdílném způsobu víření směsi a vzduchu ve válci, potažmo na způsobu tvoření vrstvené směsi při režimu částečného zatížení motoru, závisí a je také velmi důležitým prvkem poloha a umístění zapalovací svíčky tak, aby byla v optimálním bodě vytvořené vrstvené směsi. Svislý plnicí kanál, umístění zapalovací svíčky, poloha sacích a výfukových ventilů a poloha vstřikovacího ventilu je znázorněna na obrázku 19.



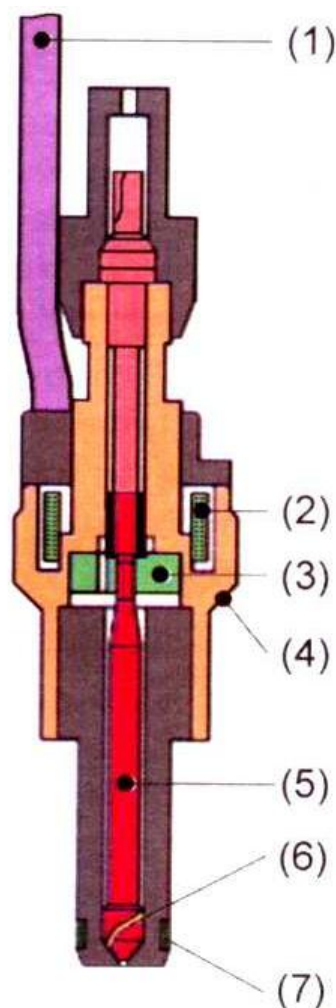
Obr. 19 Spalovací prostor a sání motoru Mitsubishi GDI [12]



Obr. 20 Tvar pístu motoru GDI [7]

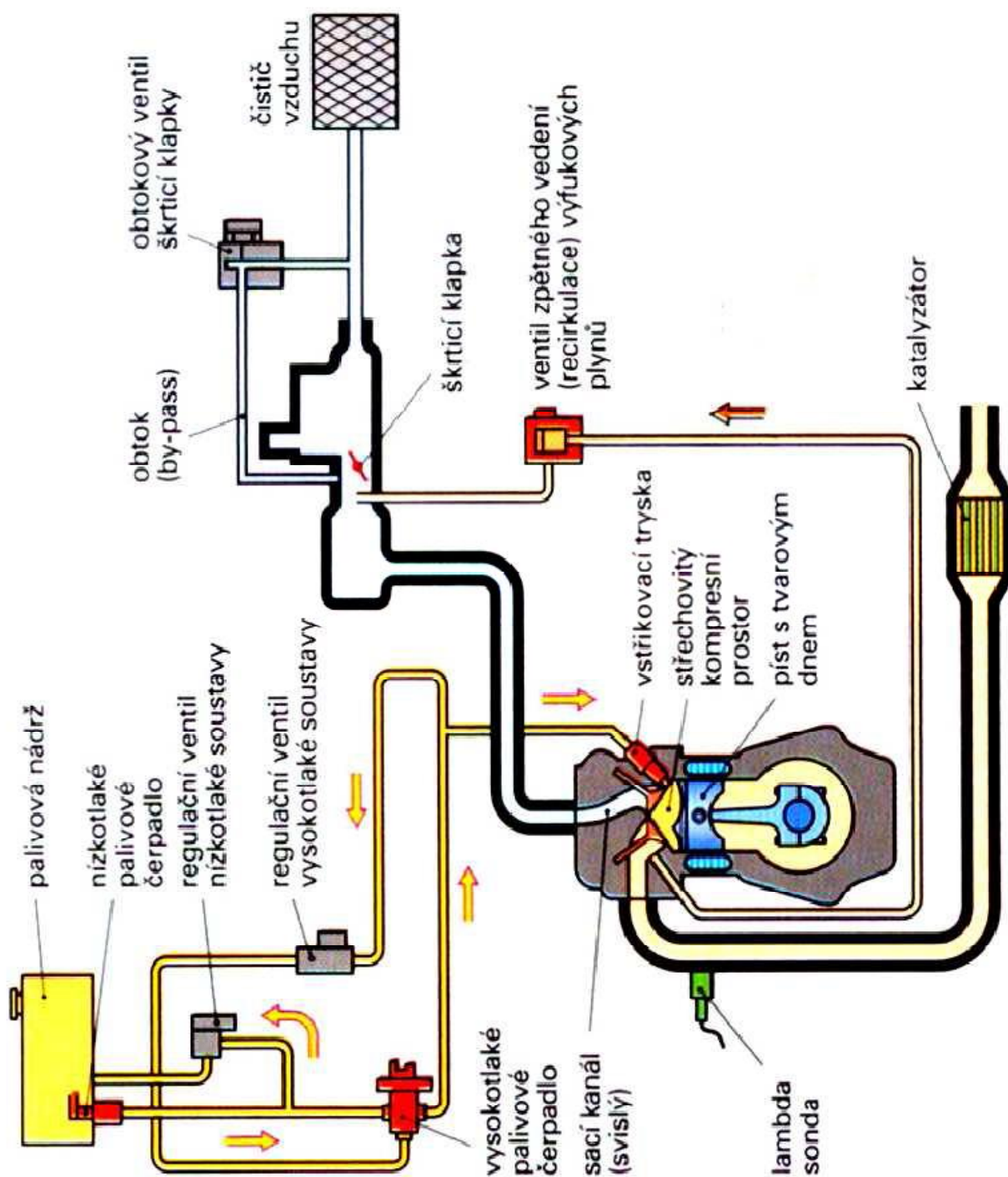
Palivová soustava (obr. 22) pracuje na podobném principu jako soustava FSI. Nízkotlakým čerpadlem je dopravováno palivo pod tlakem 0,33 MPa do jedno pístového vysokotlakého palivového čerpadla, které je poháněno vloženou hřídelí od vačkové hřídele. Vysokotlaké čerpadlo dále dopravuje palivo s přetlakem asi 5 MPa do rozdělovacího palivového potrubí, které slouží také jako zásobník tlaku (akumulační systém). Hodnota tlaku je kontrolována a řízena stejným způsobem, tedy snímačem tlaku a řídicím ventilem tlaku paliva. Vstřikování paliva zajišťují elektromagneticky ovládané vysokotlaké vstřikovací ventily (obrázek 21), které na rozdíl od systému FSI, umožňují měnit charakter a obraz vstřiku podle provozního režimu motoru. Tvar jehly ventilu umožňuje měnit úhel paprsku vstřikovaného paliva a vytvořit rotující dutý kužel kapiček paliva, které se velmi dobře promísí s nasávaným vzduchem. Jemně rozprášené palivo zároveň chladí spalovací prostor, čímž se zlepšuje objemová účinnost (skutečné nasáté objemové množství vzduchu / množství vzduchu teoretické).

Na schematickém znázornění systému GDI je dobře viditelný průchod vzduchu sacím potrubím, přičemž hlavní změnou je obtokové vedení kolem škrticí klapky (by-pass). Obtokovým vedením, je na rozdíl od elektronicky řízené škrticí klapky systému FSI, řešeno nasávání vzduchu při zcela uzavřené škrticí klapce, tedy při chodu motoru na volnoběžné otáčky, popřípadě při velmi malém zatížení.



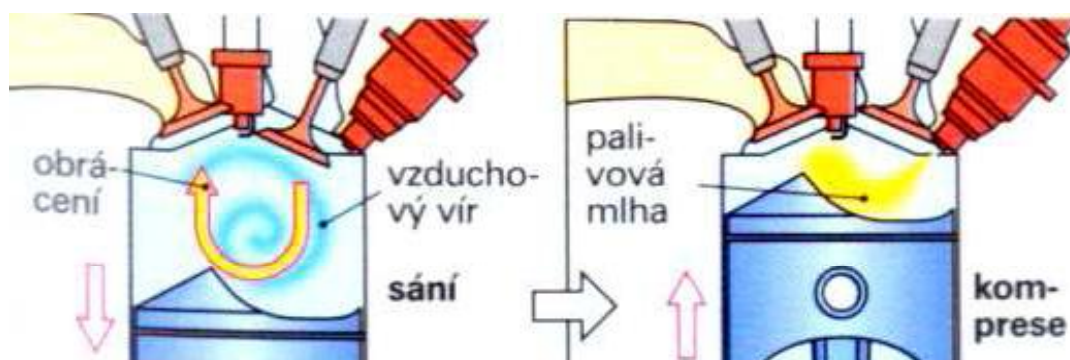
- 1 – elektrické připojení
- 2 – cívka elektromagnetu
- 3 – kotva elektromagnetu
- 4 – kuželová dosedací plocha
- 5 – jehla vstřikovacího ventilu
- 6 – drážka pro tvarování vstřikovaného paprsku paliva
- 7 – těsnicí kroužek

Obr. 21 Vysokotlaký vstřikovací ventil [4]



Obr. 22 Schéma palivové soustavy GDI [7]

Způsob práce v úsporném režimu, tedy v oblasti částečného zatížení, pracuje motor s velmi chudou směsí paliva se vzduchem. Hodnota přebytku vzduchu je v rozmezí $\lambda = 2,7 - 3,4$, což odpovídá směšovacímu poměru (40:1 až 50:1). Při chodu naprázdno a při velmi malém zatížení je vzduch nasáván přes, dříve zmiňovaný, obtokový ventil škrticí klapky, čímž se zamezí ztrátám škrcením na málo otevřené škrticí klapce. Stejně jako u systému FSI je potřeba v režimu částečného zatížení vytvořit vrstvené směsi paliva se vzduchem, aby nevznikla směs, která by byla pod mezí zápalnosti. Proto se proud nasávaného vzduchu uvádí do točivého pohybu a v době stlačování se tento proud vychyluje nahoru tvarovým dnem pístu. Do šroubovitého pohybu vzduchu ve válci je na konci komprese, krátce před horní úvratí, vstříknuto minimální potřebné množství paliva. V okolí zapalovací svíčky se vytvoří bohatá směs, která je obklopena chudými vrstvami, které se mohou skládat z čistého vzduchu a nehořlavých horkých výfukových plynů přivedených zpětným vedením (recirkulací). Recirkulace výfukových plynů snižuje hodnotu emisí oxidů dusíku (NO_x). Podíl recirkulace může být 40% a více. Vytvořená bohatá směs paliva se vzduchem v oblasti zapalovací svíčky se zažehne jiskrou a hořící palivo zapálí i okolní chudou směs, čímž je zaručeno stabilní a čisté spalování.



Obr. 23 Způsob práce v úsporném režimu [7]

Způsob práce ve výkonném režimu, tedy v horní oblasti zatížení je obtokový ventil (bypass) uzavřen a množství nasávaného vzduchu je určeno pouze polohou škrticí klapky. V době sání je palivo vstřikováno v širokém kuželu vířivou tryskou. Vytvořená směs je homogenní. Plynulý přechod provozních režimů zaručuje elektronická regulace vstřikování a zapalování systému GDI.

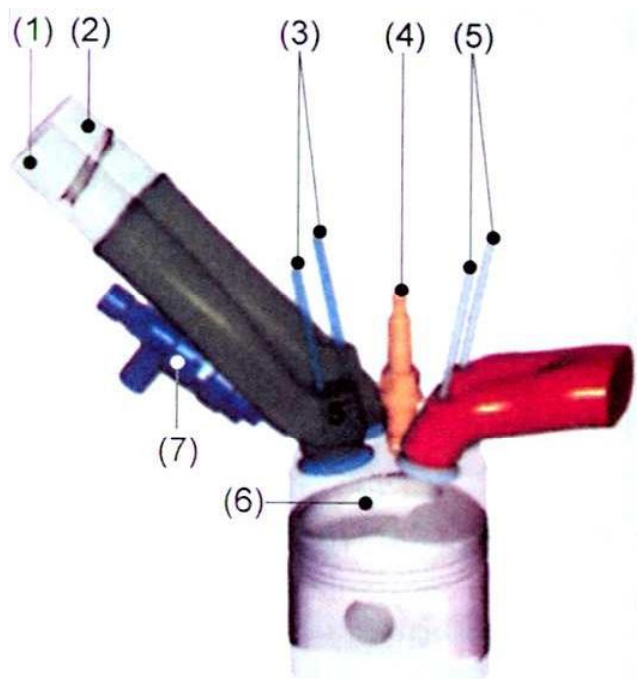


Obr. 24 Způsob práce ve výkonném režimu [7]

5.2 Systém vstřikování Toyota D-4

Systém přímého vstřikování, pod označením D-4, uvedla automobilka Toyota na japonském trhu v roce 1998. V Evropě se poprvé tento systém objevil ve voze Toyota Avensis. V následujících krocích bude porovnáván čtyřválcový motor s rozvodem DOHC, čtyřmi ventily na válec a proměnným časováním sacích ventilů VVTi (Variable inlet Valve Timing). Zajímavostí je, že pro motory V6 vyvinula Toyota pokročilejší systém vstřikování D-4S (D-4 Superior), jenž kombinuje přímé a nepřímé vstřikování použitím dvou vstřikovacích ventilů na válec.

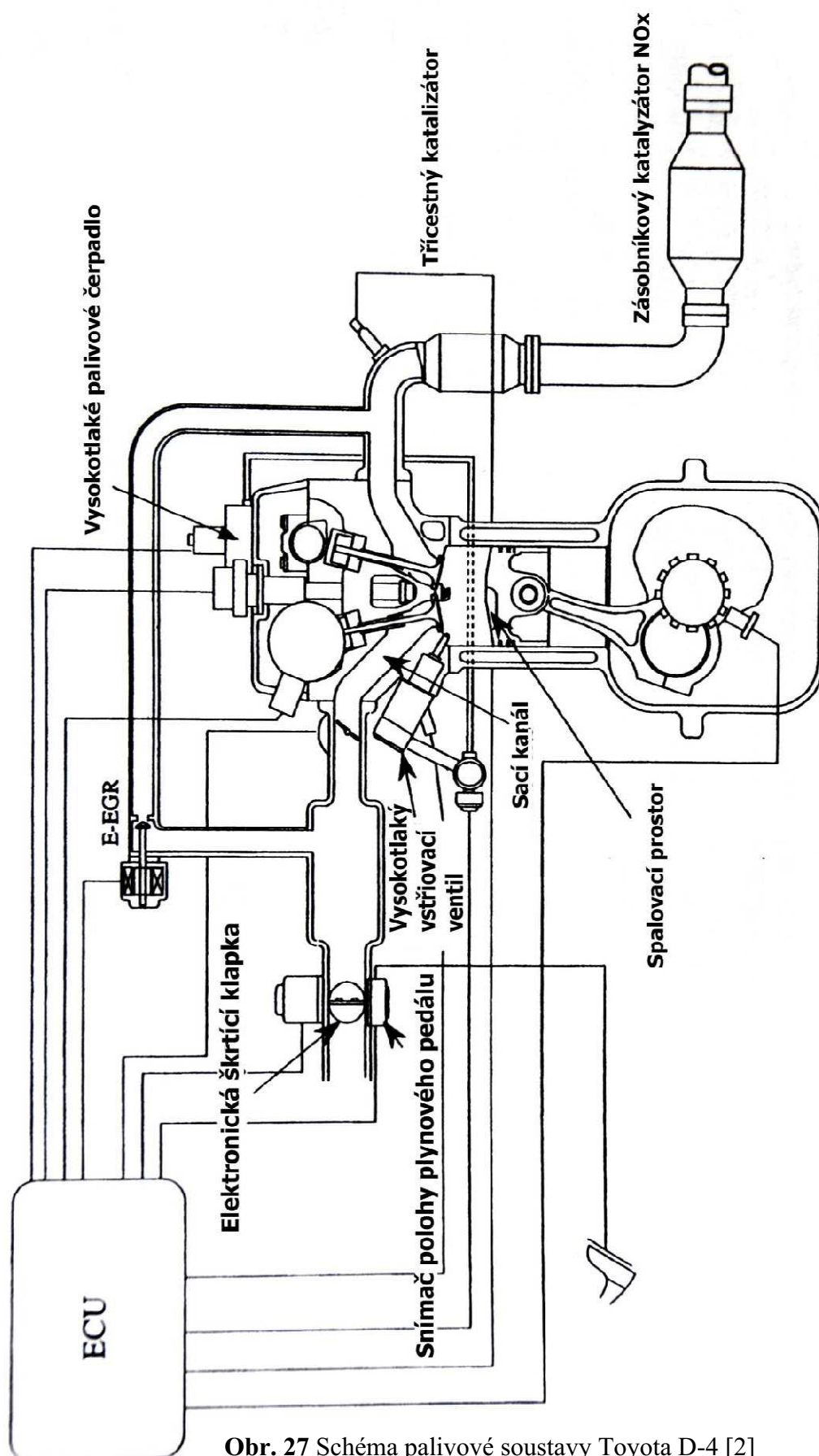
Spalovací prostor a sání opět zahrnuje několik konstrukčních odlišností. Sací kanály nejsou tak kolmé, jako u GDI, jejich sklon připomíná spíše systém FSI. Rozdílně tvarové dno pístu je opět přizpůsobeno optimálnímu proudění vzduchu ve válci s ohledem na polohu a sklon sacích kanálů. Vrstveného plnění se u motoru D-4 dosahuje vířivým prouděním vzduchu ve tvarovaném spalovacím prostoru ve dně pístu. Vzduch je do spalovacího prostoru (obr. 25) přiváděn dvěma sacími kanály, přičemž jeden z nich je opatřen šroubovým vstupem (1) a druhý je přímý (2) s elektronicky řízenou klapkou E-SCV (Electronic Swirl Control Valve), která má za úkol řídit víření vzduchu ve spalovacím prostoru motoru.



Obr. 26 Tvar pístu motoru Toyota D-4 [4]

Obr. 25 Spalovací prostor a sání motoru Toyota D-4 [4]

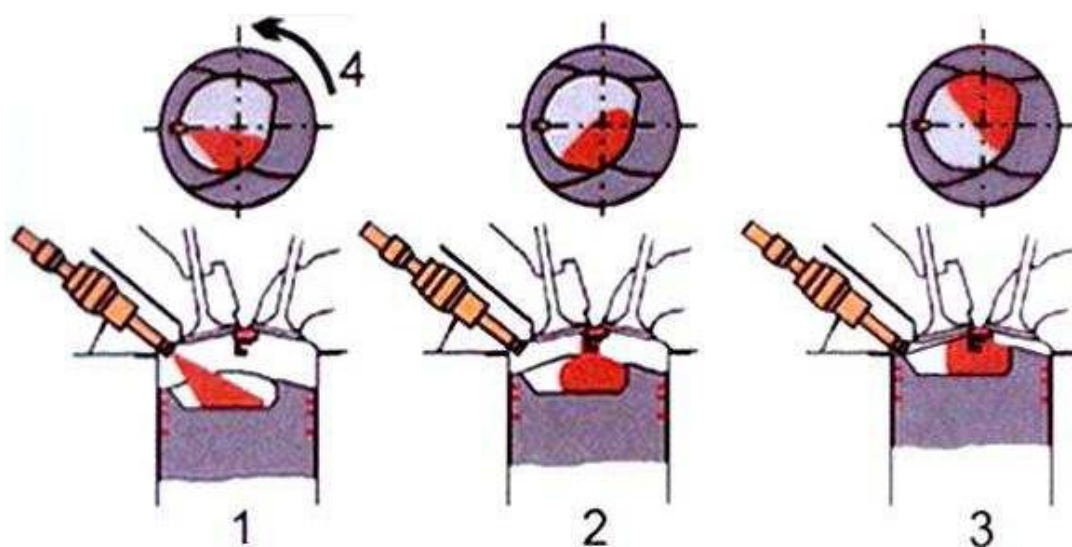
- 1 – Sací kanál se šroubovým zakončením
- 2 – Přímý sací kanál s elektronicky řízenou klapkou
- 3 – sací ventily
- 4 – zapalovací svíčka
- 5 – výfukové ventily
- 6 – spalovací prostor ve dnu pístu
- 7 – vysokotlaký vstřikovací ventil



Obr. 27 Schéma palivové soustavy Toyota D-4 [2]

Tlak v nízkotlakém okruhu palivové soustavy je zhruba 0,3 MPa, vstřikovací tlak je v rozmezí 8MPa až 12MPa.

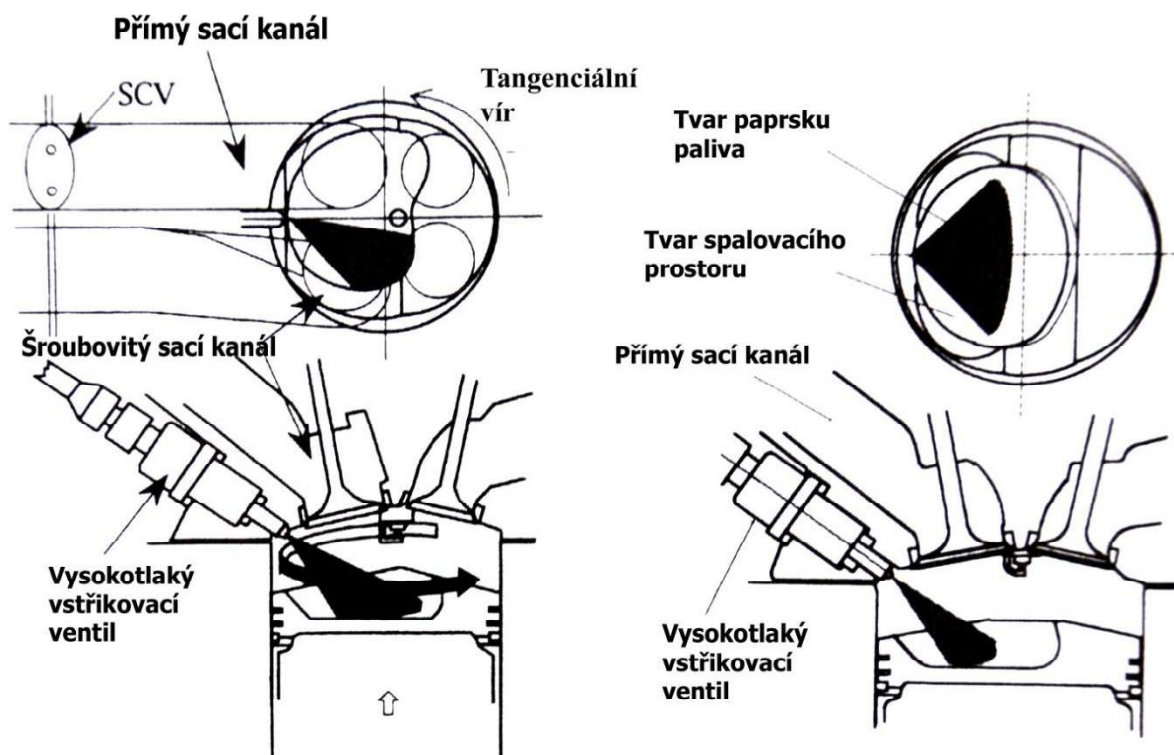
Způsob práce v úsporném režimu, tedy při částečném zatížení a nízkých otáčkách motoru, je „vířivá“ klapka E-SVC uzavřena a vzduch je nasáván pouze sacím kanálem se šroubovým zakončením vytvářejícím horizontální vír. Palivo je do proudu vzduchu vstřikováno šikmo vedle zapalovací svíčky a proud vzduchu usnadňující jeho odpaření se přivádí podél stěny spalovacího prostoru (obr.27), která se rozšiřuje ve směru víru a po zažehnutí směsi zapalovací svíčkou umožňuje rozšíření plamene přes celý spalovací prostor. Motor D-4 je díky tomuto způsobu tvoření směsi schopen spalovat velmi chudou směs se směšovací poměrem až 50:1, což je se systémy FSI a GDI srovnatelné.



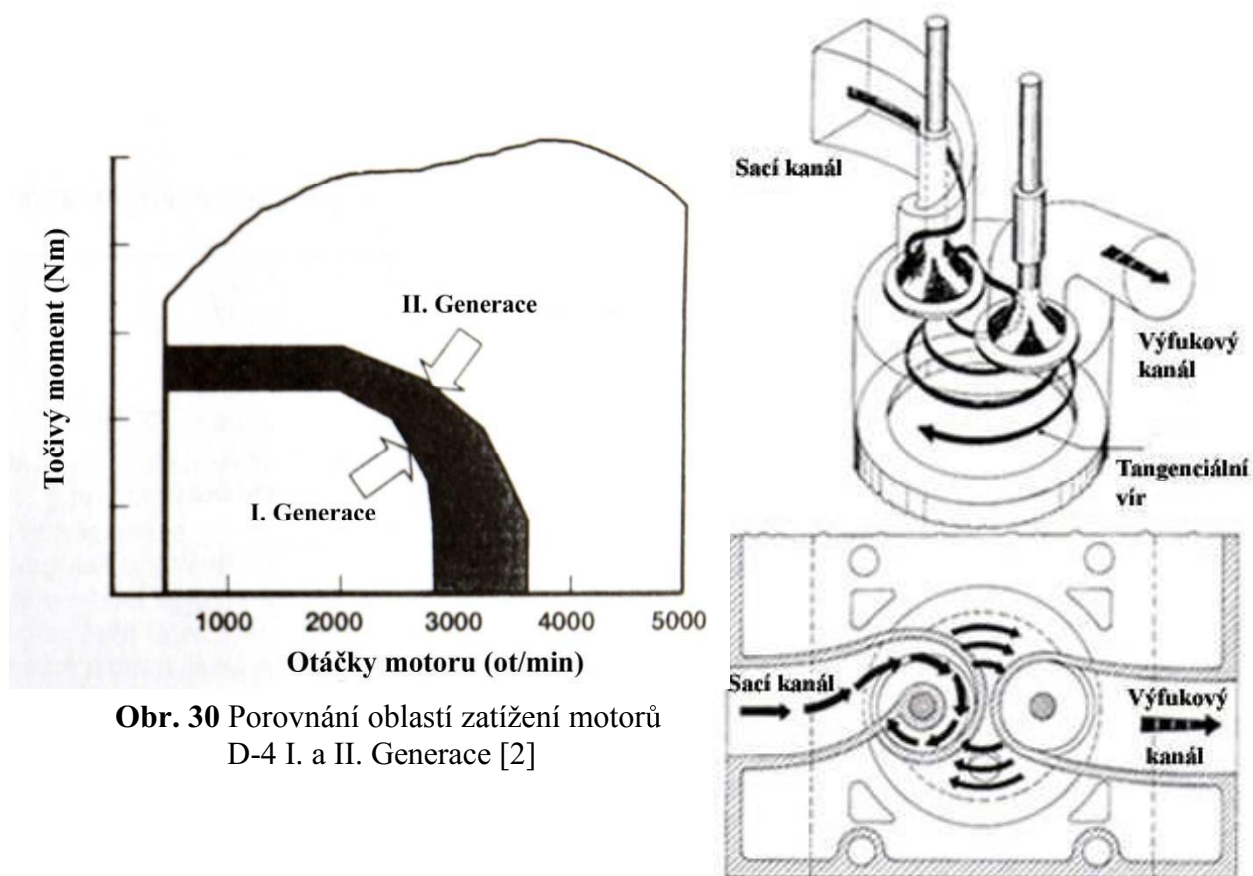
Obr. 28 Jednotlivé fáze vzniku vrstvené směsi [4]

Způsob práce ve výkonném režimu, tedy při plném zatížení a vysokých otáčkách, jsou pro nasávání vzduchu použity oba sací kanály. Palivo je vstřikováno po celou dobu sacího zdvihu a vytvořená směs je homogenní ve směšovacím poměru blízkém stechiometrickému (14,7:1).

Způsob práce v přechodovém režimu, tedy při změně zatížení motoru (akceleraci), pracuje systém D-4 srovnatelně se systémy GDI a FSI. Regulační soustava, ovládaná elektronickým pedálem akcelérátoru, reaguje na sešlápnutí tohoto pedálu zvýšením dodávky paliva ještě před otevřením škrticí klapky. Vstřikování paliva je v přechodovém režimu prováděno dvoufázově. Nejprve se v průběhu sání vstřikuje malé (tzv. pilotní) množství paliva, následná hlavní dávka je vstřikována na konci kompresního zdvihu. Přechod mezi provozními režimy je plynulý, reakce motoru na změnu zatížení rychlejší a nedochází k detonačnímu spalování motoru, které se nejčastěji objevuje při akceleraci z nízkých otáček.



Obr. 29 Porovnání tvoření směsi systému D-4 I. a II. Generace [2]



Obr. 30 Porovnání oblastí zatížení motorů
D-4 I. a II. Generace [2]

Obr. 31 Znázornění proudění vzduchu
šroubovitým sacím kanálem [2]

5.3 Systém vstřikování Saab SCC

Systém přímého vstřikování a řízení spalování SCC (Saab Combustion Control), byl vyvinut konstruktéry motorů firmy Saab ve spolupráci s koncernem GM. (General Motors). První generace byla představena na Frankfurtském autosalonu v roce 1995 a jednalo se o koncepci využívající elektrodu zapalovací svíčky umístěnou na dně pístu. Dalším vývojem vznikla druhá generace systému SCC, založena na proměnné vzdálenosti elektrod zapalovací svíčky, která byla představena v roce 2000 na Auto Show v Paříži (příloha č.15).

Jednou z odlišností systému SCC je, že vstřikování paliva do válce probíhá za pomoci stlačeného vzduchu (air – assisted fuel injection) s generátorem turbulence. Vstřikovač a zapalovací svíčka jsou integrovány do jednotky označené SPI (Spark Plug Injector). Stlačeným vzduchem je palivo vstřikováno do válce, přičemž krátká dávka stlačeného vzduchu je do válce přivedena těsně před zážehem paliva, což způsobí turbulenci, která podporuje spalování a zkracuje dobu hoření paliva. Další odlišností systému SCC je použití zapalovací svíčky s proměnnou vzdáleností elektrod. Vzdálenost elektrod je v intervalu 1 mm až 4 mm. Z centrální elektrody jednotky SPI je jiskra směřována na pevně ukotženou elektrodu ve vzdálenosti 4mm, nebo na elektrodu umístěnou na dně pístu. Vysoká energie zážehu (180 mJ) a proměnná vzdálenost elektrod jsou nezbytné pro zapalování vysoce ředěné směsi výfukovými plyny. Množství výfukových plynů závisí na provozních podmínkách motoru a obsah těchto plynů ve válci může být až 70%. Přimíchávání výfukových plynů k nasávanému vzduchu umožňuje spojitě proměnné otevírání a zavírání sacích a výfukových ventilů řízené proměnnými vačkami.



Obr. 32 Spalovací prostor a sání motoru Saab SCC [16]

1 – Integrovaná jednotka SPI

2 – Pevná elektroda



Obr. 33 Tvar pístu Saab SCC s elektrodou umístěnou ve dně pístu (pohyblivá) [16]

Firma Saab spolupracovala při vývoji přímého vstřikování za pomoci vzduchu s australskou firmou Orbital, jejichž schéma palivového systému je znázorněno na obrázku 35 a řez motoru v příloze č.14.

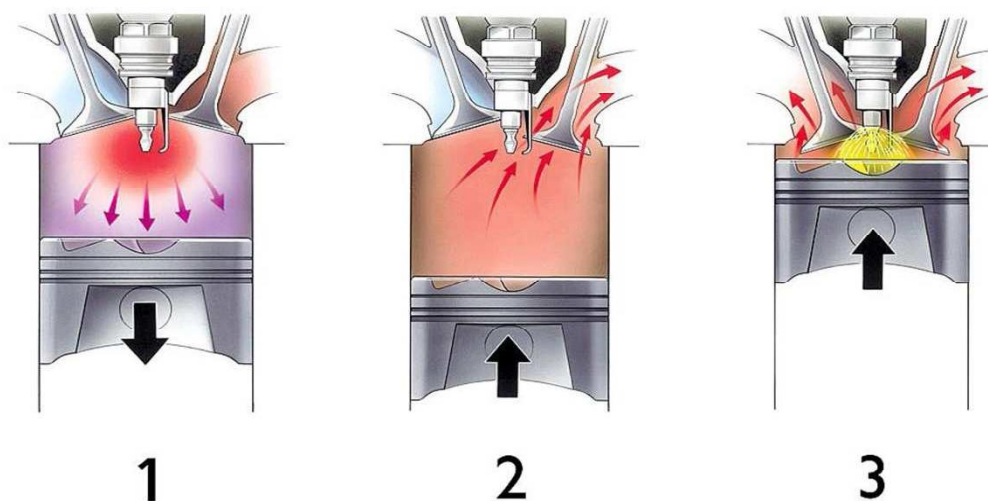
Jak již bylo řečeno, palivová směs ve spalovacím prostoru motoru se systémem SCC je složena z 60 – 70% výfukových plynů, 20 – 30 % čerstvého vzduchu a méně než 1% objemu představuje palivo. Přesné poměry samozřejmě závisí na provozních podmínkách. Při nízkém zatížení motoru je podíl výfukových plynů vyšší, naopak při vyšší zátěži motoru podíl výfukových plynů klesá. Aby bylo zajištěno zažehnutí a dostatečně rychlé spálení směsi s tak vysokým podílem výfukových plynů, je potřeba zapalovací systém, který dokáže místně aplikovat velké množství energie a vytvoří kvalitní jiskru pro zažehnutí směsi. Systém SCC pro tyto účely využívá proměnné vzdálenosti zapalovacích elektrod a vysoké energie zážehu. Jiskra, z centrální elektronky, je vedena na pevně ukotženou elektrodu ve vzdálenosti 4 mm při nízkém zatížení motoru. Při vysokém zatížení motoru je zážeh prováděn později a jiskra nemůže překonat vzdálenost 4 mm z důvodu příliš vysoké hustoty podílu výfukových plynů. Jiskra, z centrální elektrody, je proto vedena na elektrodu ve dně pístu.

Popis jednotlivých fází pracovního cyklu motoru SCC dle obrázku 34

1 – Při expanzním zdvihu je směs zažehnuta a teplo uvolněné spalováním způsobí nárůst tlaku, který stlačuje píst směrem dolů.

2 – Při dosažení dolní úvrati otvírají výfukové ventily. V důsledku rozdílu tlaku uvnitř a vně válce odchází výfukovými otvory většina výfukových plynů v krátké době při dolní úvrati pístu. Zbytek plynů odchází do výfukového potrubí při pohybu pístu do horní úvrati.

3 – Před dosažením horní úvrati, je integrovaným vstřikovačem do zapalovací svíčky vstříknuto palivo. Současně se otevřou sací ventily. Výfukovými a sacími ventily odcházejí výfukové plyny smísené s benzinem. Přesná délka časového intervalu, kdy jsou současně otevřeny sací a výfukové ventily (tedy zbytkové poměrné množství výfukových plynů ve spalovacím prostoru), je určena podle provozního režimu motoru.

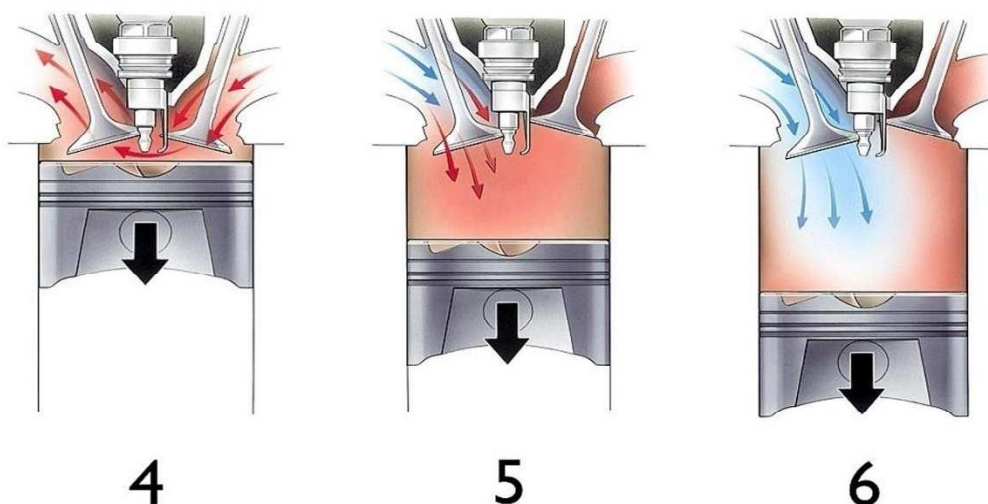


Obr. 34 a) Jednotlivé fáze pracovního cyklu (EXPANZE) [16]

4 – Při sacím zdvihu se píst pohybuje dolů. Výfukové a sací ventily jsou otevřené a směs benzínu s výfukovými plyny je vtahována zpět do válce. Z obrázku je patrné, že část směsi paliva s výfukovými plyny prochází sacím ventilem.

5 – Píst pokračuje v pohybu do dolní úvratí. Výfukové ventily zavírají, sací ventily zůstávají otevřené a část směsi paliva a výfukových plynů, jenž byly v sacím potrubí, jsou nasávány zpět do válce.

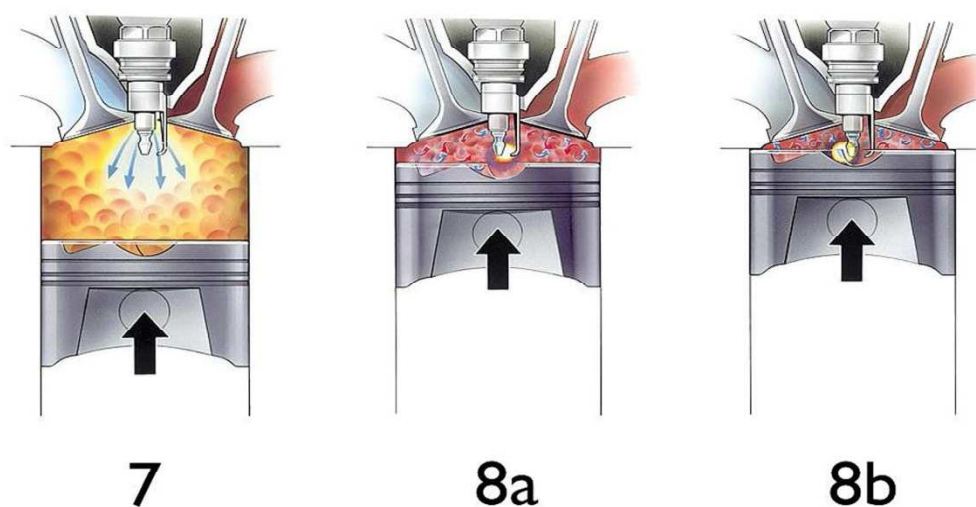
6 – Píst se blíží k dolní úvratí. Zpět do válce je již nasáta směs výfukových plynů ze sacího potrubí a potřebné množství čerstvého vzduchu.



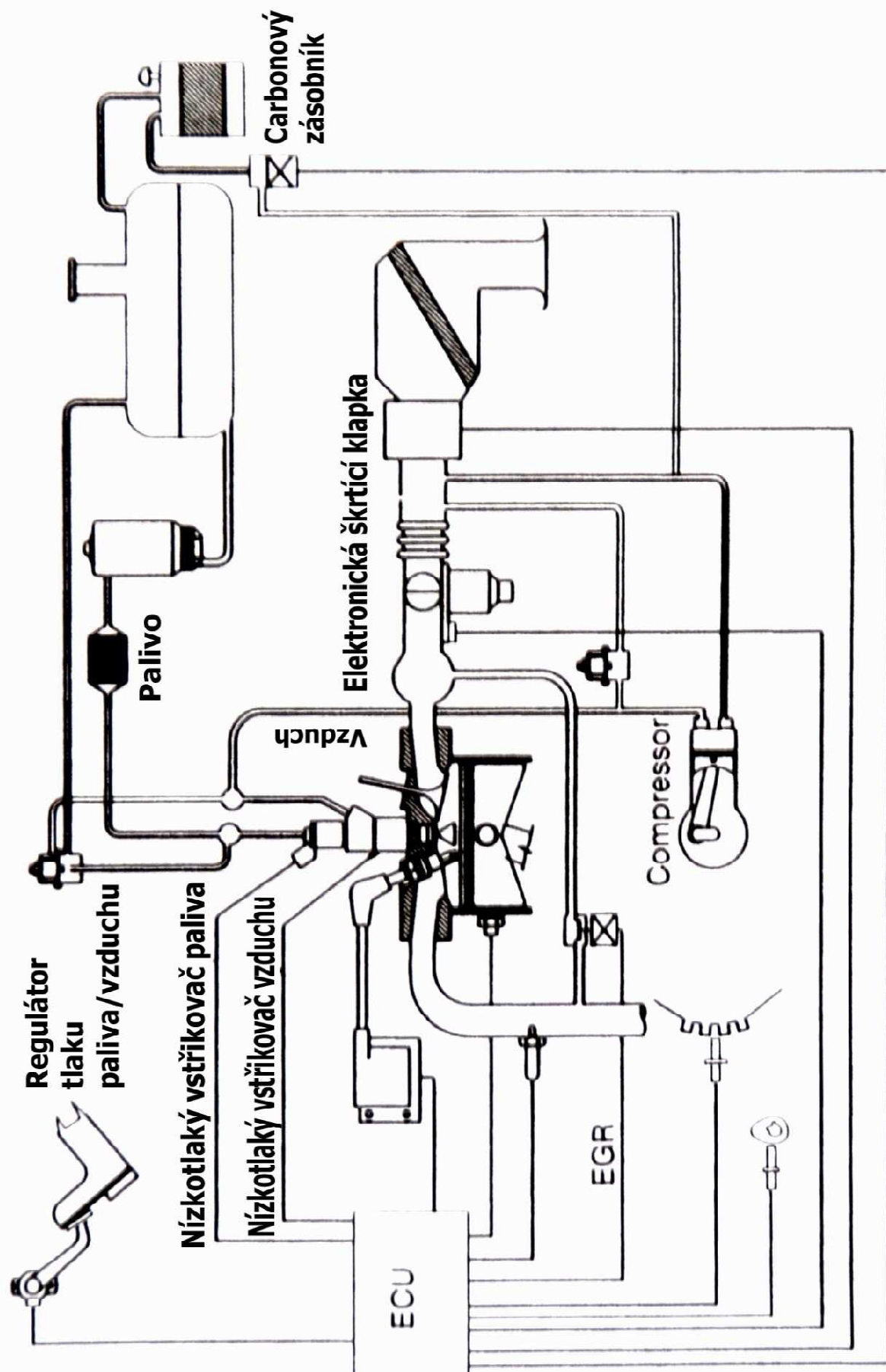
Obr. 34 b) Jednotlivé fáze pracovního cyklu (SÁNÍ) [16]

7 – Při kompresním zdvihu zavírají sací ventily a píst se pohybuje směrem vzhůru. Zhruba v polovině kompresního zdvihu je integrovaným vstřikovačem do zapalovací svíčky vypuštěna do válce krátká dávka stlačeného vzduchu, která vytvoří ve válci turbulenci podporující proces spalování a urychluje dobu hoření.

8 – Jiskra z centrální elektrody zapalovací svíčky směřující na jednu ze dvou elektrod (viz. strana 25) zažehne směs paliva se vzduchem těsně před horní úvratí.



Obr. 34 c) Jednotlivé fáze pracovního cyklu (KOMPRESSE) [16]



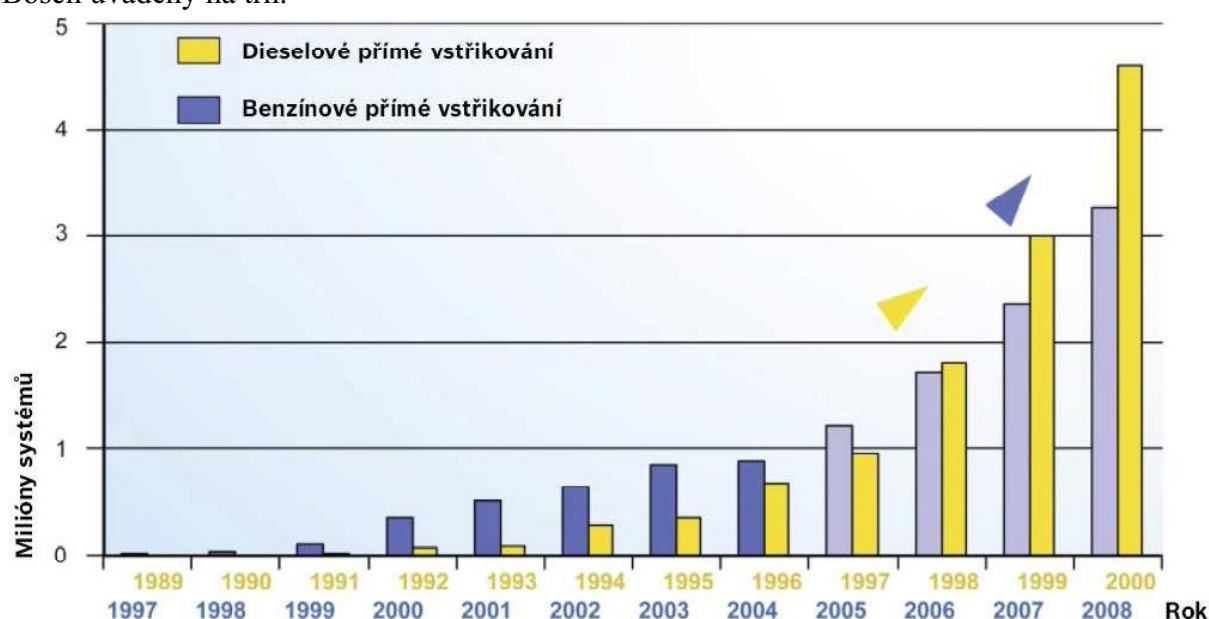
Obr. 35 Schéma palivové soustavy ORBITAL [2]

5.4 Porovnání způsobu tvorby zápalné směsi jednotlivými výrobci

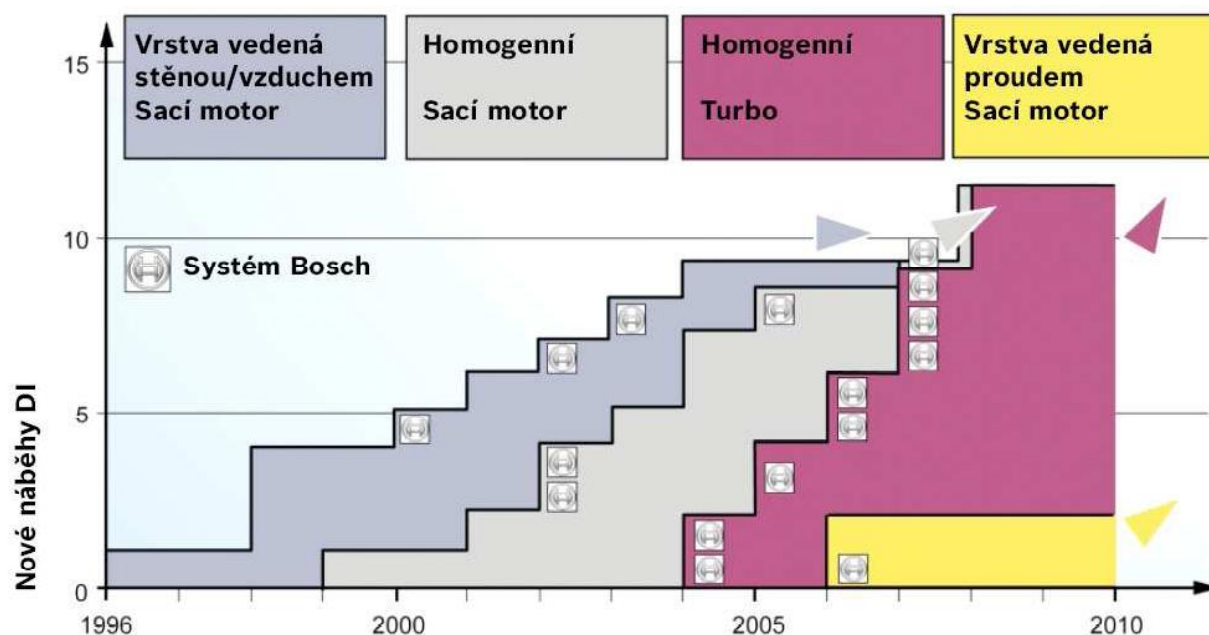
Výrobce/ označení	Objem motoru [cm ³]	Pe [kW ⁻¹] [min ⁻¹]	Mk [Nm] [min ⁻¹]	Kompresní poměr	Vrstvení směsi řízené:	Vstřikovací tlak [MPa]
Mitsubishi GDI	1864	59/6500	91/5000	12:1	stěnou	8-12
PSA HPi	1998	52/6000	85/2000	11,4:1	stěnou/klapkou	3-10
Renault IDE	2000	52/5500	100/4300	11,5:1	paprskem	4-10
Toyota D-4	1998	54/6000	98/4400	10:1	stěnou/vírem	8-13
Volkswagen FSI	1390	52/6200	93/4250	12:1	stěnou/klapkou	5-12
Alfa Romeo JTS	1859	62/6500	100/4500	11,3:1	Pracuje pouze s homogenní směsí	12
Saab SCC	1996	55/5500	120/3500	10:1		12

6. Modernější systémy přímého vstřikování, budoucnost

Současný trend, automobilových výrobců, spočívá v navyšování produkce motorů s přímým vstřikováním paliva, o čem svedší úsilí, investice výrobců a vývoj tohoto systému směrem kupředu. Je to také logické, neboť přímé vstřikování přináší řadu výhod a je také účinnou „zbraní“ ke snižování emisí oxidu uhličitého ve výfukových plynech (CO₂), který také přímo souvisí se spotřebou pohonných hmot. Limit pro nové osobní automobily, platný od roku 2008, činí 140 gramů CO₂ na kilometr jízdy. Jednou z nejúčinnějších koncepcí, ke snížení emisí CO₂ a snížení spotřeby pohonných hmot, je druhá generace vstřikování paliva firmy Bosch, nesoucí označení DI-Motronic. Firma Bosch zveřejnila graf (obr.36) zobrazující rostoucí produkci motorů s přímým vstřikováním paliva dodaných na trh v jednotlivých letech. Graf také porovnává produkci zážehových a vznětových motorů s přímým vstřikováním paliva do válce motoru, přičemž se u zážehových motorů, s tímto systémem vstřikování, očekává podobný úspěch jako u motorů vznětových. Na grafu (obr.37) je znázorněna produkce jednotlivých typů systému s přímým vstřikováním, jak byly firmou Bosch uváděny na trh.



Obr. 36 Znázornění nárůstu produkce motorů s přímým vstřikováním paliva [7]



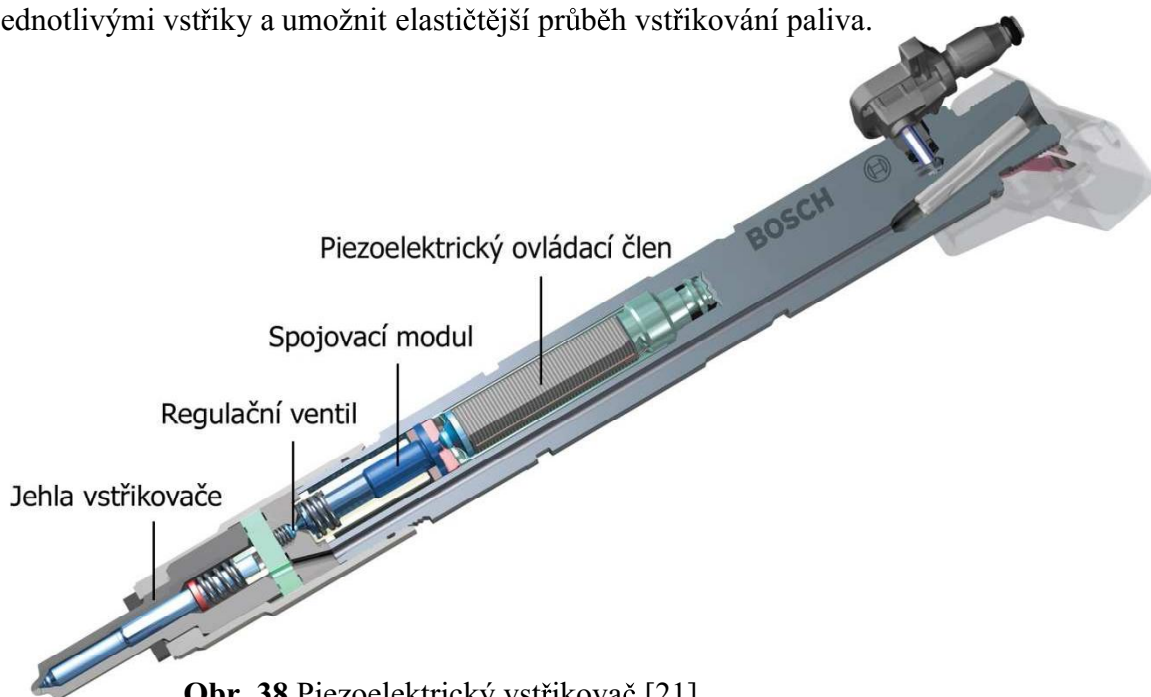
Obr. 37 Zavádění jednotlivých systémů přímého vstřikování benzínu firmy Bosch [17]

6.1 Druhá generace přímého vstřikování Bosch DI-Motronic

Cílem druhé generace přímého vstřikování benzínu, vyvinuté firmou Bosch, je ovlivnit zásadním způsobem trh, jak se to podařilo vznětovým motorům, kde hlavní úspěch spočívá především v kombinaci přímého vstřikování a přeplňování. Lze říci, že zážehové motory, určené pro osobní automobily, přebírají některé konstrukční prvky od motorů vznětových, neboť několik základních konstrukčních prvků, jakými jsou například přímé vstřikování nebo přeplňování, byly použity poprvé právě u vznětových motorů. Je ale nutno zdůraznit, že se toto tvrzení týká sériové výroby osobních automobilů, nikoliv konceptů a podobně. Přeplňování motoru společně s variabilním časováním ventilů a druhou generací přímého vstřikování paliva řeší také konflikt mezi spotřebou paliva a dynamikou jízdy. Díky této kombinaci se podařilo navýšit především točivý moment motoru již od nízkých otáček. Lepší plnění válců při snížení klepání motoru, nižší spotřeba pohonných hmot a nižší emise jsou důsledkem vysoké flexibility seřízení motoru, které mají vývojáři k dispozici díky těmto moderním konstrukčním prvkům a komponentům. V současné době, se měrný točivý moment přeplňovaných motorů vybavených systémem DI-Motronic pohybuje v rozmezí 175 až 200 Nm na litr objemu válce při specifickém výkonu 100 kW na litr objemu válce. Ve srovnání s přeplňovanými motory, které používají vstřikování do sacího potrubí, došlo ke zvýšení točivého momentu v oblasti nízkých otáček až o 50%. V následujících krocích budou popisovány jednotlivé konstrukční prvky a komponenty systému DI-Motronic druhé generace.

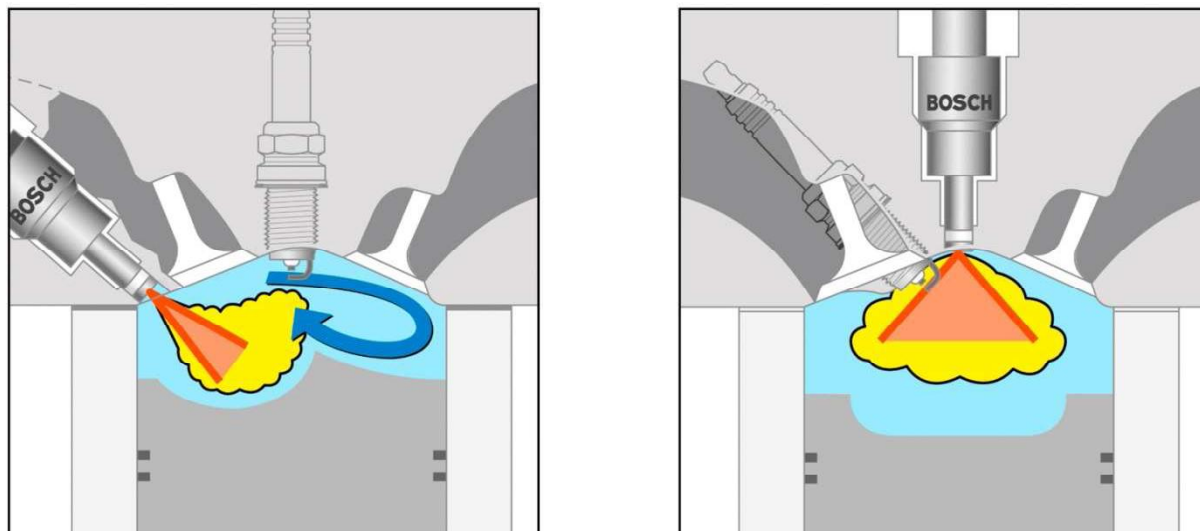
Piezelektrické vstřikovače, druhé generace systému vstřikování DI-Motronic, dovedou vstřikovat palivo pod tlakem až 20 MPa namísto dosavadních 12 MPa, kterými disponovaly elektromagneticky ovládané vstřikovací ventily. Piezelektrické vstřikovače využívají ke své činnosti nepatrné změny rozměrů krystalické struktury po připojení elektrického proudu.

V automobilovém průmyslu se místo známějšího křemíku používají krystaly z keramického materiálu, které mají také piezoelektrické vlastnosti a díky doplňku olova a oxidu zirkoničitého dobře snáší vysokou teplotu. Na mechanický pohyb jehly jsou tyto nepatrné změny převáděny pomocí tzv. piezoelementů. Piezoelement je válec vysoký cca 30 mm, tvořený z cca 400 vrstev keramické folie. Po přivedení napětí 150 V dokáže změnit svoji výšku o 0,04 mm. Tato změna rozměru je převedena na skok jehly rozprašovače 0.08mm mechanismem skládajícím se z pístu a pružin (viz. spojovací modul obr.38). Výhodou piezoelektrických vstřikovačů je snížení hmotnosti pohybujících se částí (především jehly), a to z obvyklých 16 gramů na pouhé 4 gramy. Díky tomu se jehla vstřikovače může pohybovat rychleji, což pomáhá preciznějšímu dávkování paliva, lepšímu rozprášení ve spalovacím prostoru a přesnějšímu časování vstřiku. Další výhodou je možnost navyšovat počet vstřiků během jednoho pracovního cyklu motoru. Například pět vstřiků je rozděleno na: dva předvstřiky, pilotní vstřik a dva dovstřiky. Díky rychlému přepínání vstřikovače, (přibližně 1 ms, to je méně než polovina doby, kterou potřebuje elektromagnetické ovládání) v důsledku rychlejší reakce na povely řídicí jednotky motoru, se podařilo zkrátit prodlevy mezi jednotlivými vstřiky a umožnit elastičtější průběh vstřikování paliva.



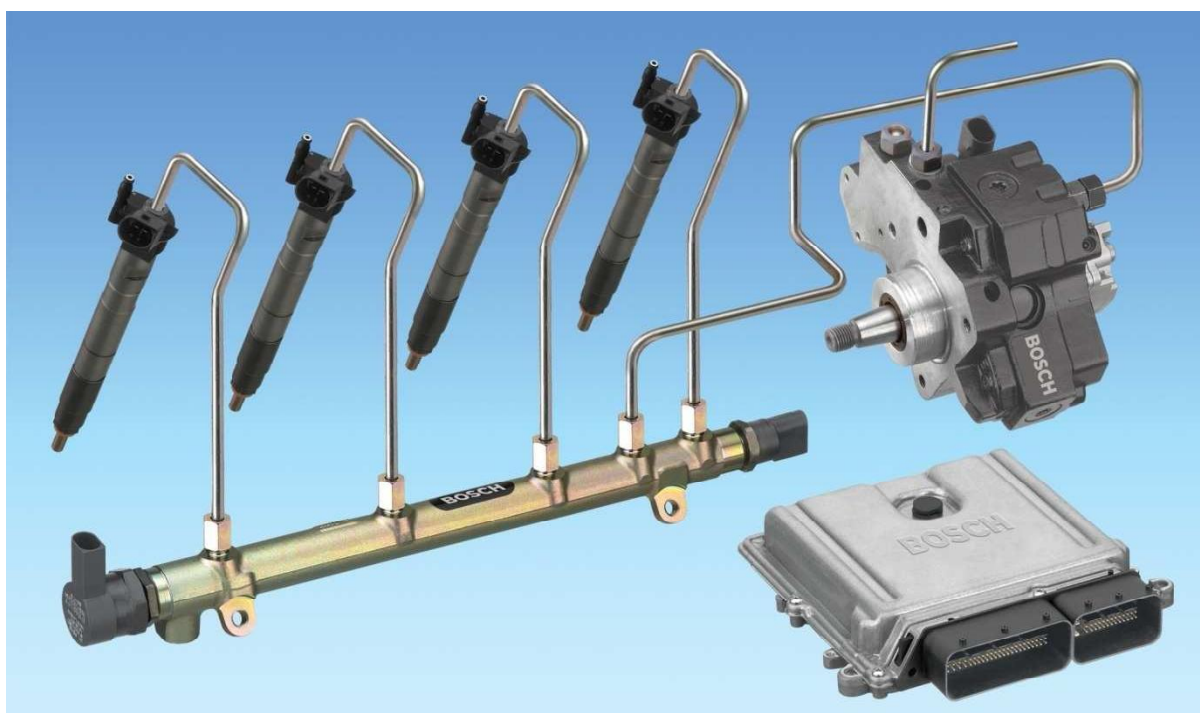
Obr. 38 Piezoelektrický vstřikovač [21]

Použitím piezoelektrických vstřikovačů je spalování řízeno paprskem, nikoliv stěnou, jak tomu bylo u předchozí generace. Výhodou je využití vrstveného plnění do vyšších otáček motoru přiváděním paliva přímo před zapalovací svíčku. Větší omezenost práce motoru s vrstvenou směsí ve vyšších otáčkách, je u předchozích systémů tvoření vrstvené směsi vírem vzduchu a následné kompresi způsobena tím, že se vír stává při vyšších otáčkách motoru nekontrolovatelným. Tato skutečnost by mohla způsobit, že směs paliva se vzduchem by byla nezažehnutelná. Podmínka vrstvení bohatší směsi u zapalovací svíčky a chudší směsi v odlehlejších místech by mohla být vlivem nekontrolovatelného víru narušena, proto dochází při vyšších otáčkách motoru k přepínání na homogenní směs. Rozdíl mezi řízením spalování stěnou a paprskem paliva je znázorněn na obrázku 39.



Obr. 39 Rozdíl mezi řízením spalování stěnou a paprskem paliva [19]

Vysokotlaké čerpadlo bylo také, pro systém vstřikování DI-Motronic druhé generace, nově vyvinuto. Zásadní konstrukční změnou je použití pouze jednoho pístu k vytvoření potřebného tlaku ve vedení paliva, oproti tří pístovému čerpadlu první generace. Pohon čerpadla zajišťuje přídavná vačka, stejně jako u jeho předchůdce, ale otáčky jsou tři krát větší, čímž je snížení počtu pístů kompenzováno. Počet hydraulických přípojek se snížil ze tří na pouhé dvě: přívod paliva a vedení k tlakovému zásobníku (vysokotlaký obvod). Odpadá tak zpětné vedení do nádrže díky integrovanému ventilu pro regulaci množství paliva. Tím je také příkon vysokotlakého čerpadla podstatně nižší, než u čerpadla s tlakovou regulací. Významnou výhodou, oproti první generaci, je menší konstrukční velikost, nižší hmotnost a také kompatibilita vzhledem k různým kvalitám paliva po celém světě. Hlavní části řídicího systému motoru, včetně vysokotlakého palivového čerpadla, jsou znázorněny na obrázku 40.



Obr. 40 Hlavní části řídicího systému Bosch DI-Motronic druhé generace [21]

6.2 Systém vstřikování Siemens -VDO PDI

Dalším moderním systémem přímého vstřikování uvedeným na trh je systém PDI koncernu Siemens-VDO. Nejedná se však o sdružený vstřikovač (čerpadlo-tryska), jak by se na první pohled mohlo zdát a může být matoucí z označení vstřikování u vznětových motorů PD (**P**umpe **D**üse). Označení PDI je u systému Siemens-VDO (**P**iezoelectric **D**irect **I**njection). Jedná se tedy o vstřikování a spalování řízené paprskem paliva s použitím piezoelektrických vstřikovačů. Očekáváním od tohoto systému bylo snížení spotřeby paliva, oproti motorům se vstřikováním do sacího potrubí, až o 20%. Stejně jako u dříve uvedeného systému Bosch DI-Motronic druhé generace (viz kapitola 6.1), je palivo vstřikováno přímo před zapalovací svíčku, což umožňuje rozšíření režimu spalování vrstvené směsi. Siemens-VDO PDI je tedy dalším systémem vstřikování, který splňuje vysoké požadavky na vstřikovací tlak, rychlost a přesnost vstřikovaného množství paliva. Vyšší přesnost dávkování množství paliva piezoelektrickým vstřikovačem, je také umožněna částečným otevřením (uzavřením) vstřikovací trysky. Vysokotlaké vstřikovací čerpadlo s axiálními písty a odměrováním množství paliva dovede vyprodukovat tlak až 20MPa, díky kterému je průměr kapének rozprášeného paliva jen kolem 0,015 mm. Samostatným mazacím okruhem se také podařilo snížit třecí ztráty a zvýšit tak účinnost vysokotlakého čerpadla. Řízení motoru obstarává 32 bitová řídicí jednotka.



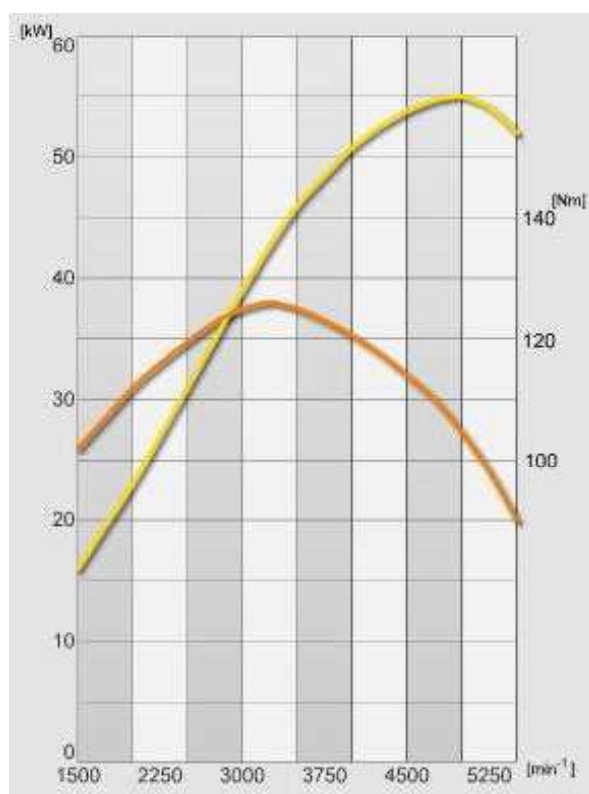
Obr. 41 Hlavní části řídicího systému Siemens-VDO PDI [24]

7. Porovnání základních parametrů motorů

7.1 Se vstřikováním paliva do sacího potrubí



Výrobce	Škoda auto
Označení motoru	1.4 MPI
Počet válců	4
Rozvodový mechanismus	2xOHC
Objem motoru [cm ³]	1389
Největší výkon při otáčkách/min [kW/min-1]	55/5000
Největší točivý moment při ot./min [Nm]	126/3300
Kompresní poměr	10,5 : 1
Exhalační norma	EU 4
Nejvyšší rychlost [km/h]	171
Zrychlení z 0 na 100 km/h [s]	15,3
Spotřeba - městský cyklus [l/100km]	9,1
Spotřeba - mimo město [l/100km]	5,4
Spotřeba - kombinovaná [l/100km]	6,8
Zdvih [mm]	76,5
Vrtání [mm]	75,6

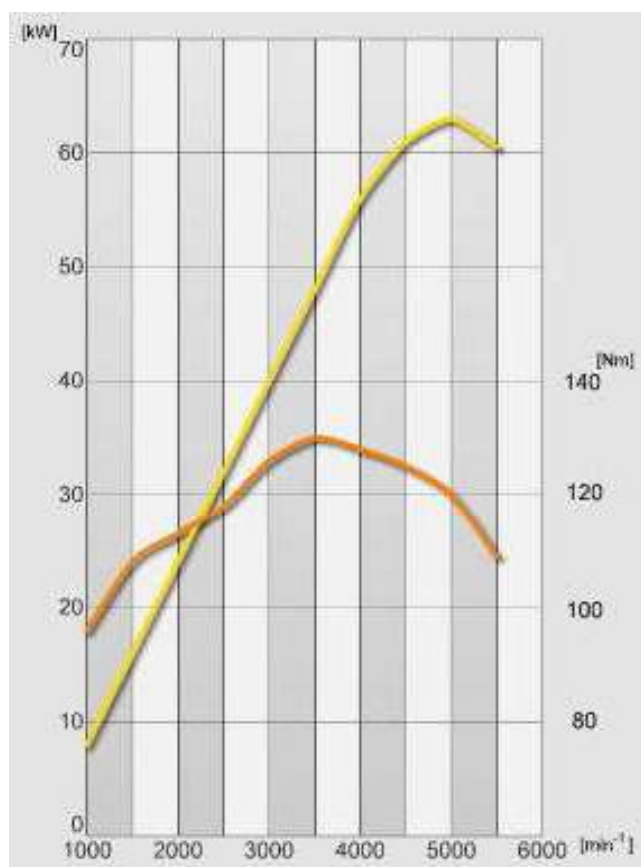


Obr. 42 a) Vnější charakteristika motoru [32]

7.2 S přímým vstřikováním paliva



Výrobce	Volkswagen
Označení motoru	1.4 FSI
Počet válců	4
Rozvodový mechanismus	2xOHC
Objem motoru [cm ³]	1 390
Největší výkon při otáčkách/min [kW/min ⁻¹]	63 /5000
Největší točivý moment při ot./min [Nm]	130/3750
Kompresní poměr	10,5 : 1
Exhalační norma	EU 4
Nejvyšší rychlost [km/h]	178
Zrychlení z 0 na 100 km/h [s]	12,1
Spotřeba - městský cyklus [l/100km]	8,6
Spotřeba - mimo město [l/100km]	5,8
Spotřeba – kombinovaná [l/100km]	6,3
Zdvih [mm]	75,6
Vrtání [mm]	76,5

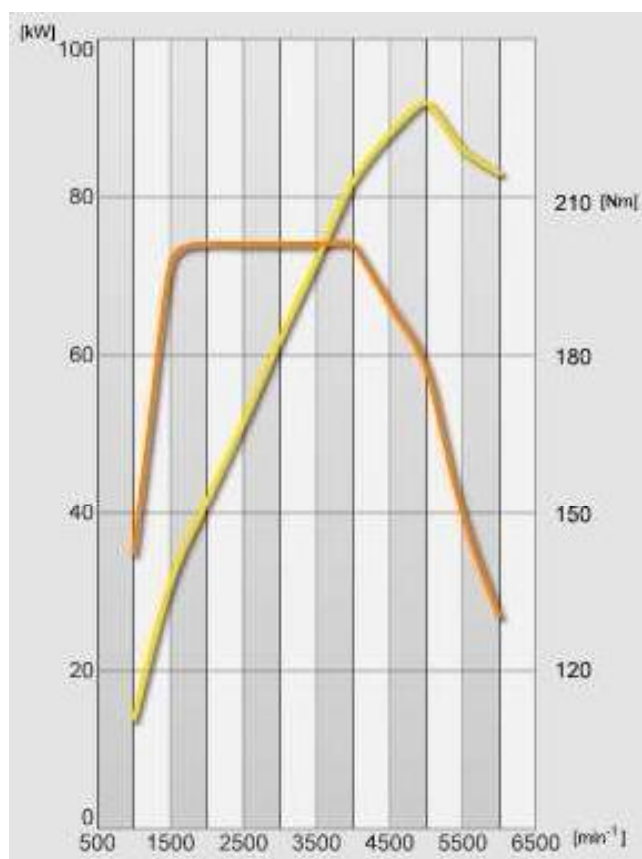


Obr. 42 b) Vnější
charakteristika
motoru [32]

7.3 S přímým vstřikováním paliva a přeplňováním



Výrobce	Škoda auto
Označení motoru	1.4 TSI
Počet válců	4
Rozvodový mechanismus	2xOHC
Objem motoru [cm ³]	1390
Největší výkon při otáčkách/min [kW/min-1]	92/5000
Největší točivý moment při ot./min [Nm]	200/1500-4000
Kompresní poměr	10,1 : 1
Exhalační norma	EU 4
Nejvyšší rychlost [km/h]	201
Zrychlení z 0 na 100 km/h [s]	10,5
Spotřeba - městský cyklus [l/100km]	8,6
Spotřeba - mimo město [l/100km]	5,5
Spotřeba – kombinovaná [l/100km]	6,6
Zdvih [mm]	75,6
Vrtání [mm]	76,5



Obr. 42 c) Vnější charakteristika motoru [32]

Závěr

Přímé vstřikování výrazně přispívá nejen ke snižování spotřeby paliva, jehož světové zásoby ve formě ropy, mnohokrát diskutované a prognostikované, nejsou samozřejmě neomezené, ale přispívá také ke snižování emisí výfukových plynů, jejichž jednotlivé složky negativně působí na životní prostředí a nepříznivě také ovlivňují lidské zdraví.

Některé systémy přímého vstřikování jednotlivých automobilových výrobců, pro snížení spotřeby paliva, využívají možnost vrstveného plnění válců, které umožňuje spalování velmi chudé směsi (s velkým součinitelem přebytku vzduchu) při částečném zatížení motoru. Nevýhoda vyšších emisí oxidů dusíku (NO_x), způsobená spalováním velmi chudé směsi, je řešena zásobníkovým katalyzátorem. Obsah síry v palivu tento katalyzátor ničí, proto jsou kladeny vysoké požadavky na kvalitu paliva.

Přínosem je také, do jisté míry, zvýšení aktivní bezpečnosti provozu na pozemních komunikacích, neboť zvýšení výkonu a točivého momentu, jenž tento systém vstřikování umožňuje, zlepšuje vlastnosti zmenšující jízdní nedostatky, tedy výkon motoru, potažmo akceleraci vozidla.

Druhá generace přímého vstřikování navýšila výhody, především možnosti tvorby vrstvené směsi do vyšších otáček motoru, díky řízení tvorby směsi a spalování paprskem paliva vstřikovaným přímo před zapalovací svíčkou, nikoli řízením stěnou nebo vírem vzduchu. Piezoelektrické vstřikovače a vysokotlaké palivové čerpadlo umožňují také vstřikovat palivo pod větším tlakem (20MPa) a navyšovat počet vstřiků v jednom pracovním zdvihu pístu, což mimo jiné pomáhá lepšímu rozprášení (atomizování) paliva ve spalovacím prostoru.

Produkce motorů s přímým vstřikováním benzínu se v současné době zvyšuje. Výhody systému přímého vstřikování, uvedené v tomto shrnutí, je možné dále umocnit systémy variabilního časování ventilů a u druhé generace přímého vstřikování benzínu také v technologii přeplňování motoru. I díky těmto komponentům by se mohlo přímé vstřikování u zážehových motorů dočkat podobných úspěchů, co se týká produkce, jako přímé vstřikování u motorů vznětových.

Snahu, co možná nejvíce, navyšovat účinnost zážehových motorů přímé vstřikování benzínu podporuje a je dobrou perspektivou do budoucna.

Seznam použitých zdrojů

- [1] VLK, F. *Elektronické systémy motorových vozidel*. František Vlk, 2002. 298 s. ISBN 80-238-7282-6
- [2] ZHAO, F., HARRINGTON, D., LAI, M. *Automotive Gasoline Direct-Injection Engines*. SAE International, 2002. 325 s. ISBN 978-0-7680-0882-1
- [3] MOTEJL, V., HOREJŠ. K. *Učebnice pro řidiče a opraváře automobilů*. Littera, 2001. 600 s. ISBN 80-85763-14-1
- [4] JAN, Z., ŽDÁNSKÝ, B. *Automobily 4, příslušenství 2. vydání*. Avid Brno, 2003. 305 s. ISBN neuvedeno
- [5] RAUSCHER, J. *Spalovací motory*, Studijní opory. VUT Brno. 235 s.
- [6] VLK, F., RAUSCHER, J. *Příslušenství motorových vozidel*, Studijní opory. VUT Brno. 196 s.
- [7] GSCHEIDLER, R. a kolektiv. *Příručka pro automechanika*. Sobotáles, 2002. 637 s. ISBN 80-85920-83-2
- [8] MOTEJL, V. *Vstřikovací zařízení zážehových motorů*. Kopp, 2003. 273 s. ISBN 80-7232-141-2
- [9] Wikipedia. *Mercedes-Benz 300SL* [online]. 2009, poslední revize 12.02.2009 [cit.2009-11-02]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mercedes-Benz_300SL>.
- [10] LÁNIK, Ondřej. *Emisní norma Euro 5 je na cestě* [online]. 2005, poslední revize 3.5.2009 [cit.2009-12-02] Dostupné z: <<http://news.auto.cz/aktuality/emisni-norma-euro-5-je-na-cestě.html>>.
- [11] CERMÁN, Jiří. *EURO 5: Zdraží emisní limity automobily?* [online]. 2008, poslední revize 28.4.2009 [cit.2009-12-02]. Dostupné z: <<http://www.nazeleno.cz/doprava/emise/euro-5-zdrazi-emisni-limity-automobily.aspx>>.
- [12] CHRISTIANY, Paul. *Die Plattform für die Kfz-Technik* [online]. 2002, poslední revize 15.4.2009 [cit.2009-12-03]. Dostupné z: <http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/brennverfahren_wand_tumble.jpg>.
- [13] CHRISTIANY, Paul. *Die Plattform für die Kfz-Technik* [online]. 2002, poslední revize 15.4.2009 [cit.2009-12-03]. Dostupné z: <<http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/otto/fsiaudi.jpg>>.
- [14] MOTEJL, Vladimír. *Vstřikování benzínu u zážehových motorů* [online]. 2007, poslední revize 2.4.2009 [cit.2009-10-03]. Dostupné z: <http://auto.amoskadan.cz/images/obrazy/ventil_rizeni_tlaku_paliva.jpg>.
- [15] MOTEJL, Vladimír. *Přímé vstřikování benzínu - Části systému a jeho činnost* [online]. 2007, poslední revize 2.4.2009 [cit.2009-10-03]. Dostupné z: <<http://auto.amoskadan.cz/texty/casticinnost.htm>>.
- [16] EDGAR, Julian. *The Saab Combustion Control System* [online]. 2000, poslední revize 1.4.2009 [cit.2009-18-04]. Dostupné z: <http://autospeed.com/cms/A_0766/article.html>.

- [17] LEONHARD, Rolf. *Přímé vstřikování pro silné, úsporné a čisté zážehové motory* [online]. Boxberg: Přednáška na 57. mezinárodním tiskovém kolokviu o automobilové technice, červen 2005 [cit.2009-20-03].
Dostupné z: < http://www.bosch.cz/press/detail.asp?f_id=422 >.
- [18] LEONHARD, Rolf. *Pohon automobilů v budoucnosti - nižší obsah škodlivých emisí, alternativní pohony a obnovitelná paliva* [online]. Boxberg: Přednáška na 58. mezinárodním tiskovém kolokviu o automobilové technice, červen 2007 [cit.2009-20-03].
Dostupné z: < http://www.bosch.cz/press/detail.asp?f_id=608 >.
- [19] LEONHARD, Rolf. *Doplňkové funkce k přímému vstřikování benzínu: Pohled do technologie budoucích zážehových motorů* [online]. Boxberg: Přednáška na 56. mezinárodním tiskovém kolokviu o automobilové technice, červen 2003 [cit.2009-20-03].
Dostupné z: < http://www.bosch.cz/press/detail.asp?f_id=267 >.
- [20] LEONHARD, Rolf. *Přímé vstřikování pro silné, úsporné a čisté zážehové motory* [online]. Boxberg: Přednáška na 57. mezinárodním tiskovém kolokviu o automobilové technice, červen 2005 [cit.2009-20-03].
Dostupné z: < http://www.bosch.cz/press/detail.asp?f_id=422 >.
- [21] LEONHARD, Rolf. *Nová generace vstřikovacích systémů: Piezo a další technologie dělají vznětový motor ještě čistším a úspornějším* [online]. Boxberg: Přednáška na 56. mezinárodním tiskovém kolokviu o automobilové technice, červen 2003 [cit.2009-20-03].
Dostupné z: < http://www.bosch.cz/press/detail.asp?f_id=269 >.
- [22] MAREK, Pavel. *Dokonalá příprava směsi znamená nízké emise. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2007, listopad [cit.2009-22-03]. Dostupné z: < <http://www.mmspektrum.com/clanek/dokonala-priprava-smesi-znamena-nizke-emise> >.
- [23] MAREK, Pavel. *Přímé vstřikování moderních zážehových motorů. MM Průmyslové spektrum* [online]. 2005, říjen [cit.2009-12-03]. Dostupné z: < <http://www.mmspektrum.com/clanek/prime-vstrikovani-modernich-zazehovych-motoru> >.
- [24] LÁNÍK, Ondřej. *PDI: budoucnost zážehového motoru* [online]. 2004, poslední revize 15.4.2009 [cit.2009-15-04].
Dostupné z: < <http://news.auto.cz/aktuality/pdi-budoucnost-zazehoveho-motoru.html> >.
- [25] SZENGEL, Rüdiger. *Větší výkon, menší žízeň. Volkswagen magazín* [online]. 2004, březen [cit.2009-02-03]. Dostupné z: < <http://www.volkswagen.cz/zajimavosti/magazin-4-8/> >.
- [26] Volkswagen international. *Motor* [online]. 2008, poslední revize 1.5.2009 [cit.2009-27-03]. Dostupné z: < <http://www.volkswagen.cz/technika/motory/> >.
- [27] MEIER, Walt. *BMW přímý vstřík, Stop / Start na všechny modely* [online]. 2005, poslední revize 06.03.2009 [cit.2009-05-03]. Dostupné z: < <http://www.greencarcongress.com/datearchive.html> >.(9/2005)

- [28] Bredik projekt. Systém řízení spalování SCC. *i-magazín* [online]. 2007, duben [cit.2009-07-03]. Dostupné z:
< <http://www.i-magazin.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2007030012>>.
- [29] WAN, Mark. *Green Engine Technology - Petrol Engines* [online]. 2000, poslední revize 05.03.2009 [cit.2009-06-03]. Dostupné z:
< http://www.autozine.org/technical_school/engine/petrol1.htm>.
- [30] DOVAT, François. *Injection Essence* [online]. 2003, poslední revize 08.03.2009 [cit.2009-02-03].
Dostupné z: < <http://www.auto-innovations.com/site/phototheque/pmot-inje.html>>.
- [31] Anima Publishers. *Slovník pojmů* [online]. 2008, poslední revize 08.04.2009 [cit.2009-11-03]. Dostupné z:
< <http://www.auto.cz/main.php?akce=pojmem&id=205&site=slovník>>.
- [32] Škoda auto a.s. *Modely, technická data* [online]. 2009, poslední revize 05.05.2009 [cit.2009-28-04]. Dostupné z:
< <http://new.skoda-auto.com/CZE/Pages/home.aspx>>.

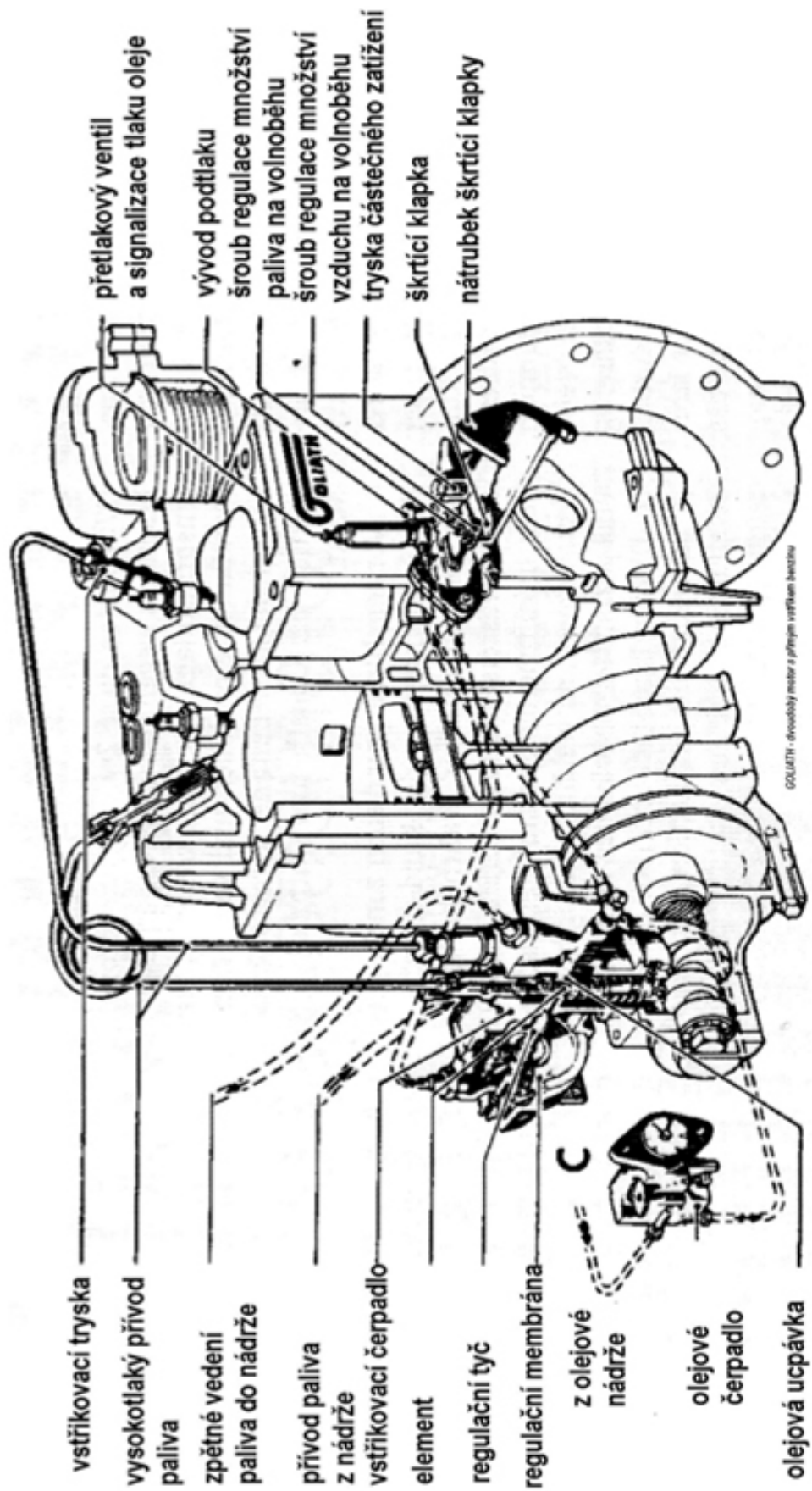
Seznam použitých zkratk a symbolů

ABS	Antiblock Braking Systém
ASR	Anti Slip Regulation
CAN-Bus	Controller Area Network Bus
CO ₂	Oxid uhličitý
DI	Direct Injection
DOHC	Double Overhead Camshafts
EGAS	Elektronický plynový pedal
EGR	Exhaust Gas Recirculation
E-SCV	Electronic Swirl Control Valve
FDR	Systému řízení dynamiky jízdy (Fahrdynamikregelung)
GDI	Gasoline Direct Injection
GM	General Motors
HC	Nespálené uhlovodíky
HPi	Higt Pressure Injection
JTS	Jet Thrust Stoichiometric
LSF	Lambda Sonde Flach
LSU	Lambda Sonde Universal
MPI	Multi Point Injection
NO _x	Oxidy dusíku
PD	Pumpe Düse
PDI	Piezoelectric Direct Injection
ppm	Parts per milion
PROCO	PROgrammed COmbustion
SCC	Saab Combustion Control
SPI	Single Point Injection
SPI	Spark Plug Injector
VVTi	Variable inlet Valve Timing

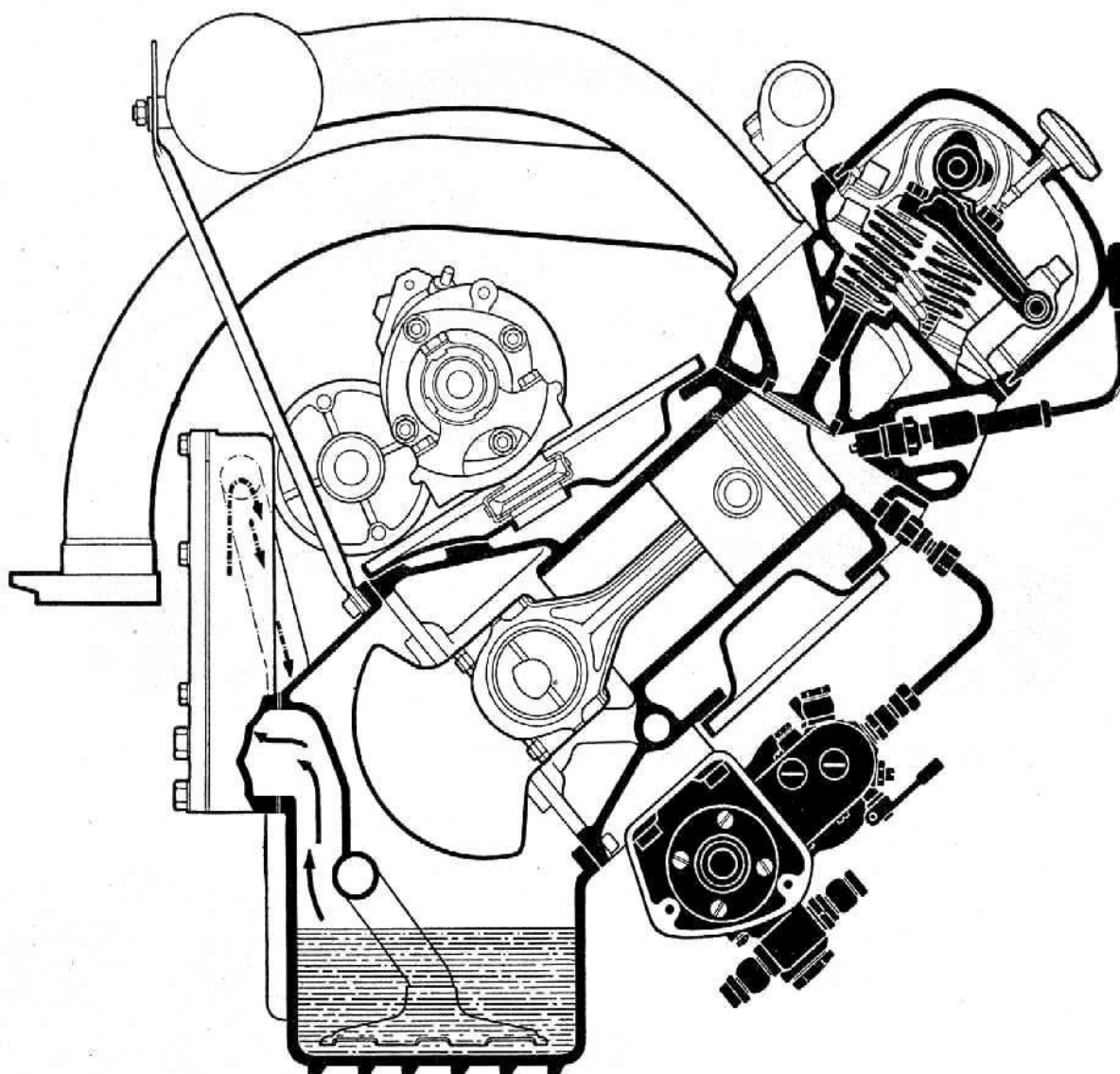
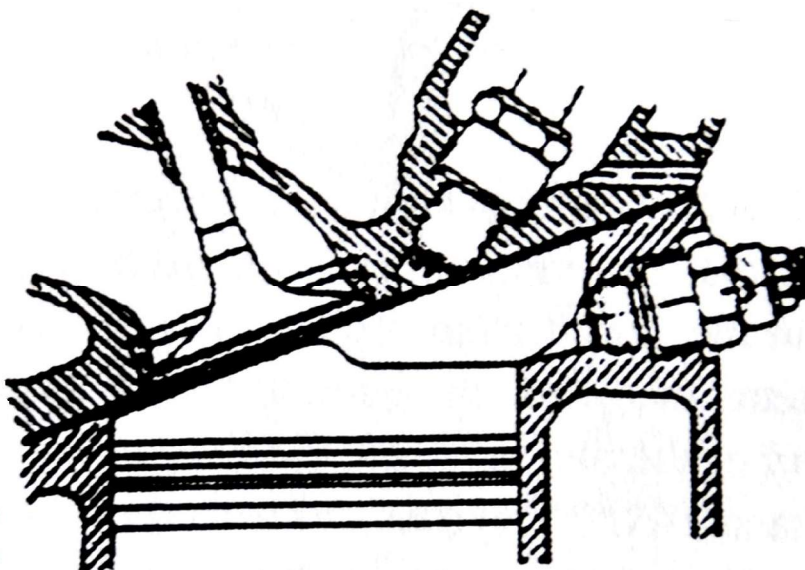
Označení	Jednotka	Název
Mk	[Nm]	Točivý moment
p	[MPa]	Tlak
P	[kW]	Výkon
t	[min]	Čas
U	[V]	Elektrické napětí
V	[cm ³]	Objem

Seznam příloh

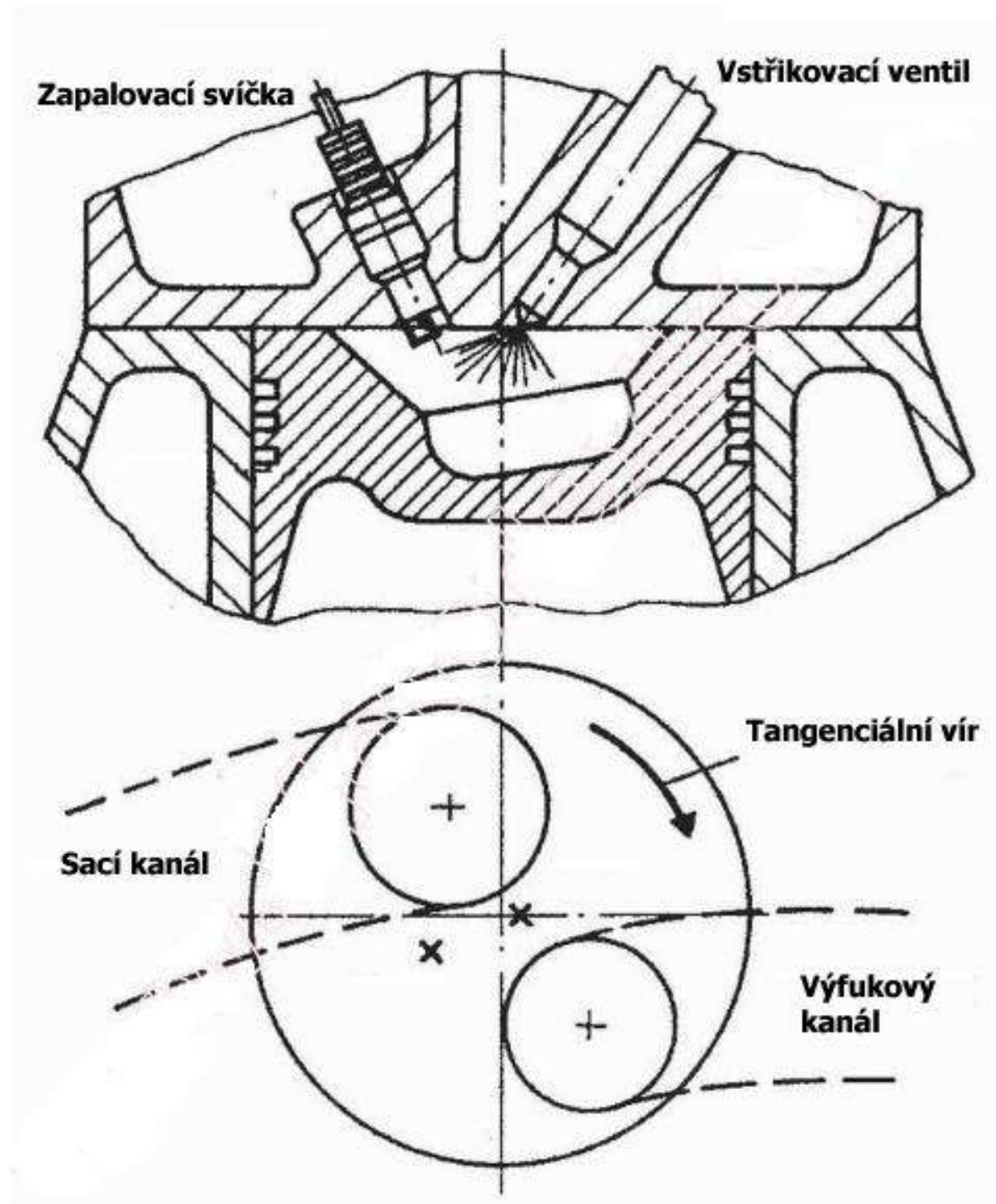
Příloha č.1	Dvoudobý dvouválcový motor Goliat.....	p1
Příloha č.2	Řez motoru Mercedes Benz 300 SL.....	p2
Příloha č.3	Spalovací prostor Ford Proco.....	p3
Příloha č.4	Schéma systému vstřikování Bosch MED.....	p4
Příloha č.5	Příčný a podélný řez vysokotlakým vstřikovacím čerpadlem BOSCH.....	p5
Příloha č.6	Bosch MED7 (FSI) systém Tumble.....	p6
Příloha č.7	Bosch MED7 (FSI) zásobník tlaku paliva, znázornění v řezu motoru.....	p7
Příloha č.8	Bosch MED7 (FSI) způsob proudění vzduchu.....	p8
Příloha č.9	Bosch MED7 (FSI) řez motorem.....	p9
Příloha č.10	Bosch MED7 (FSI) průběh vstřikování paliva.....	p10
Příloha č.11	Bosch MED7, řez motorem Volkswagen 1,4 FSI.....	p11
Příloha č.12	Řez motorem Mitsubishi GDI.....	p12
Příloha č.13	Řez motorem Orbital.....	p13
Příloha č.14	Systém vstřikování Saab SCC.....	p14
Příloha č.15	TSI – přeplňování motoru kompresorem a turbodmychadlem.....	p15



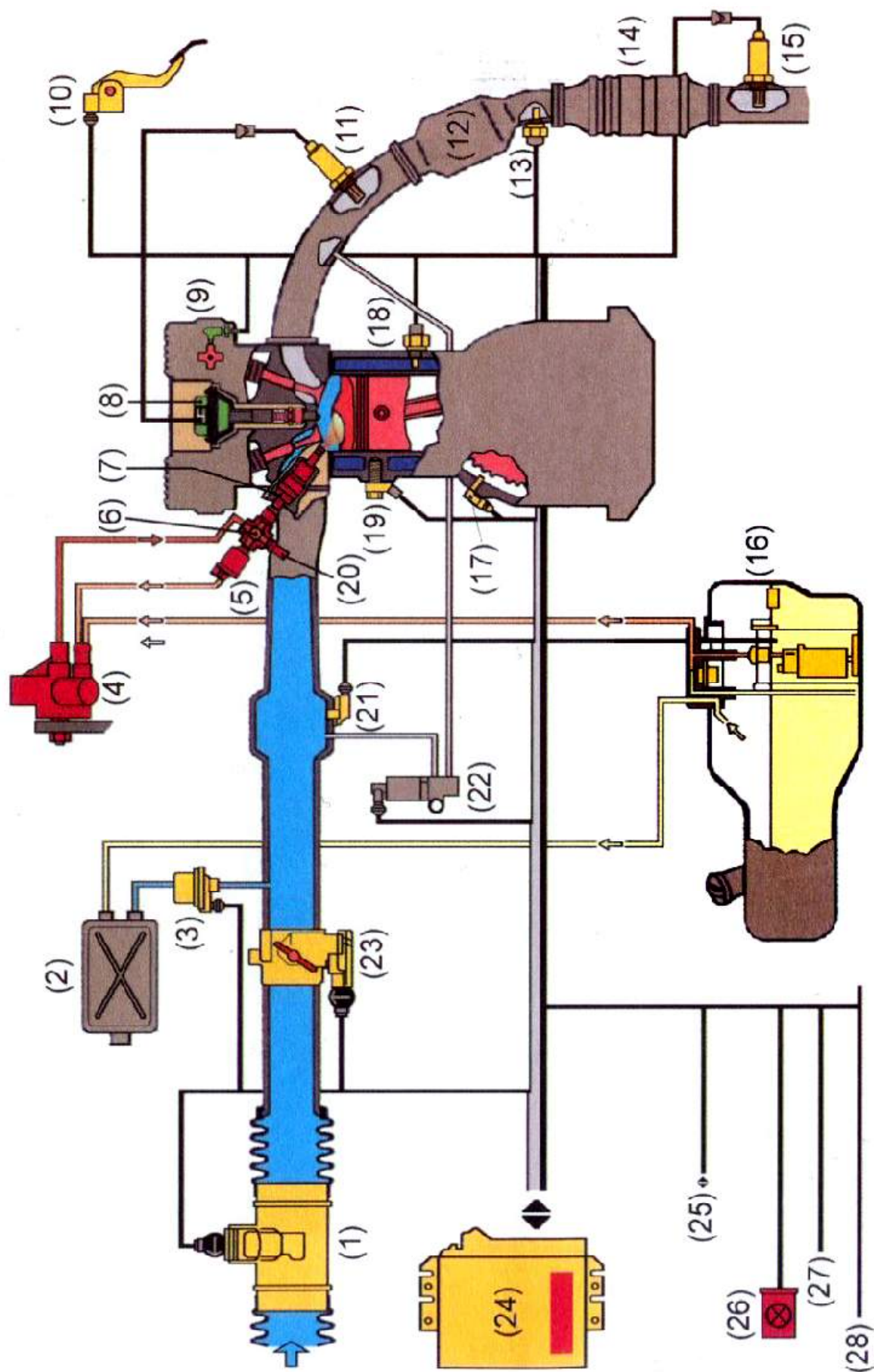
Příloha č.1 Dvoudobý dvouválcový motor Goliat [9]



Příloha č.2 Řez motoru Mercedes Benz 300 SL [9]



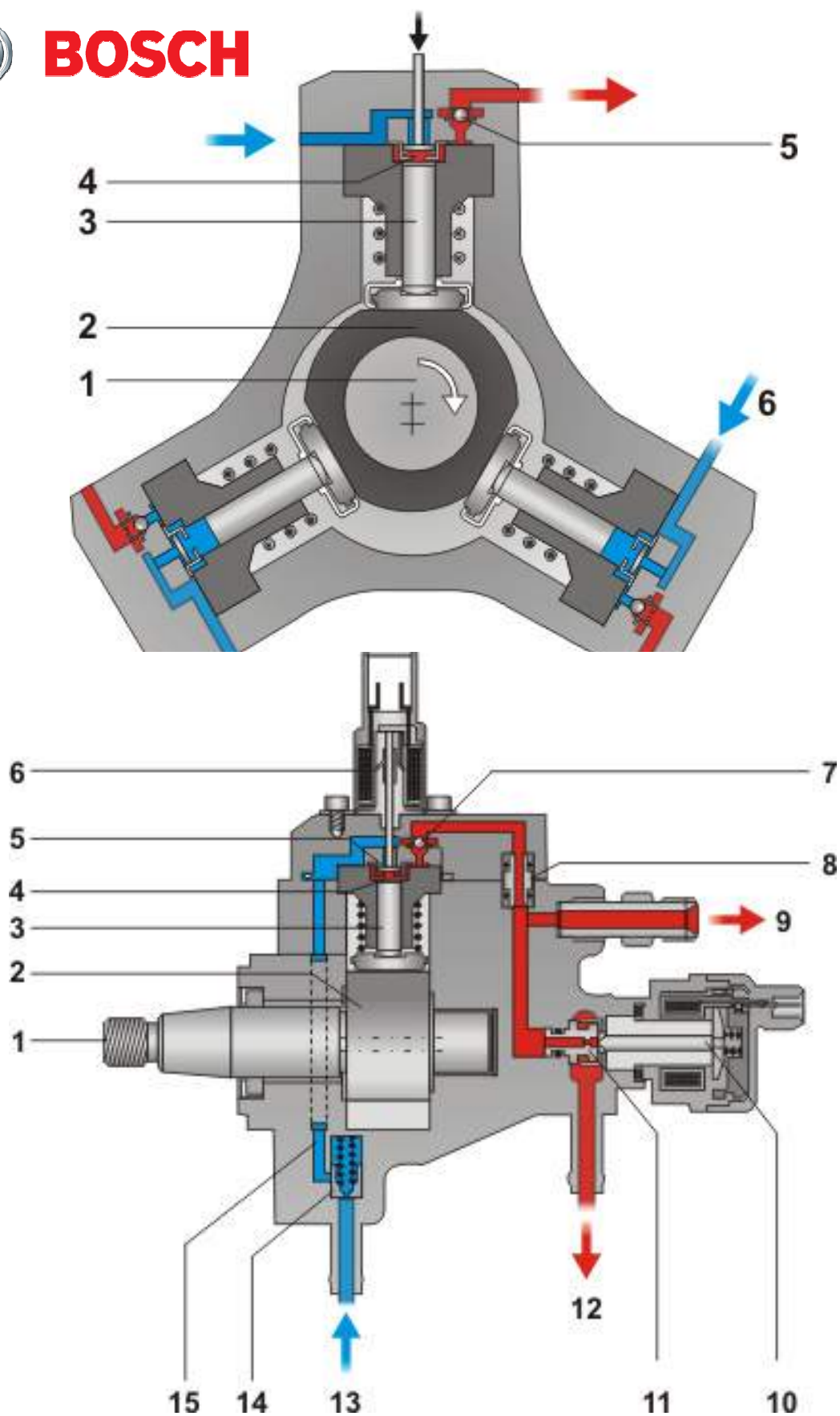
Příloha č.3 Spalovací prostor Ford Proco [2]



Příloha č.4 Schéma systému vstřikování Bosch MED 7 (FSI) [4]



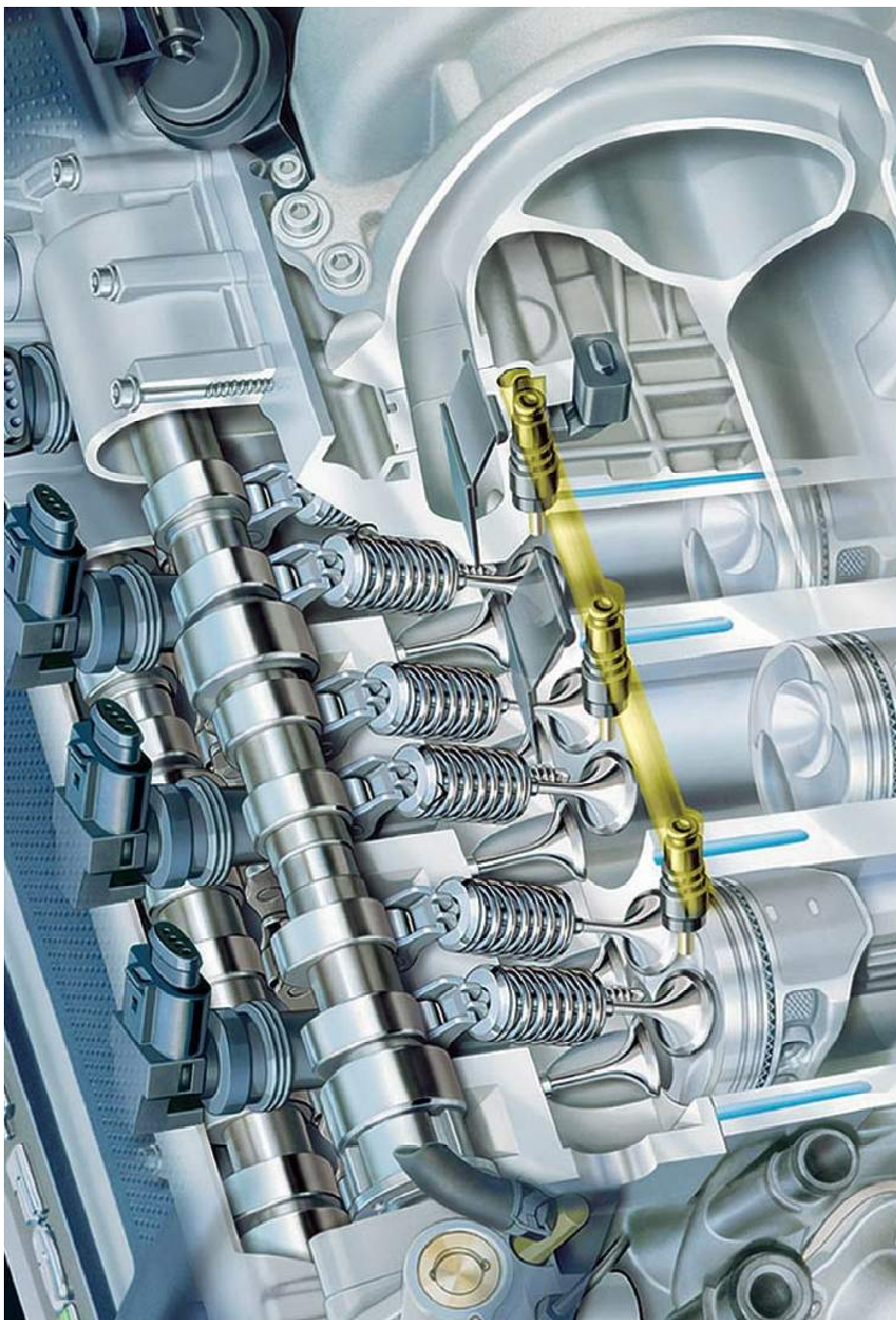
BOSCH



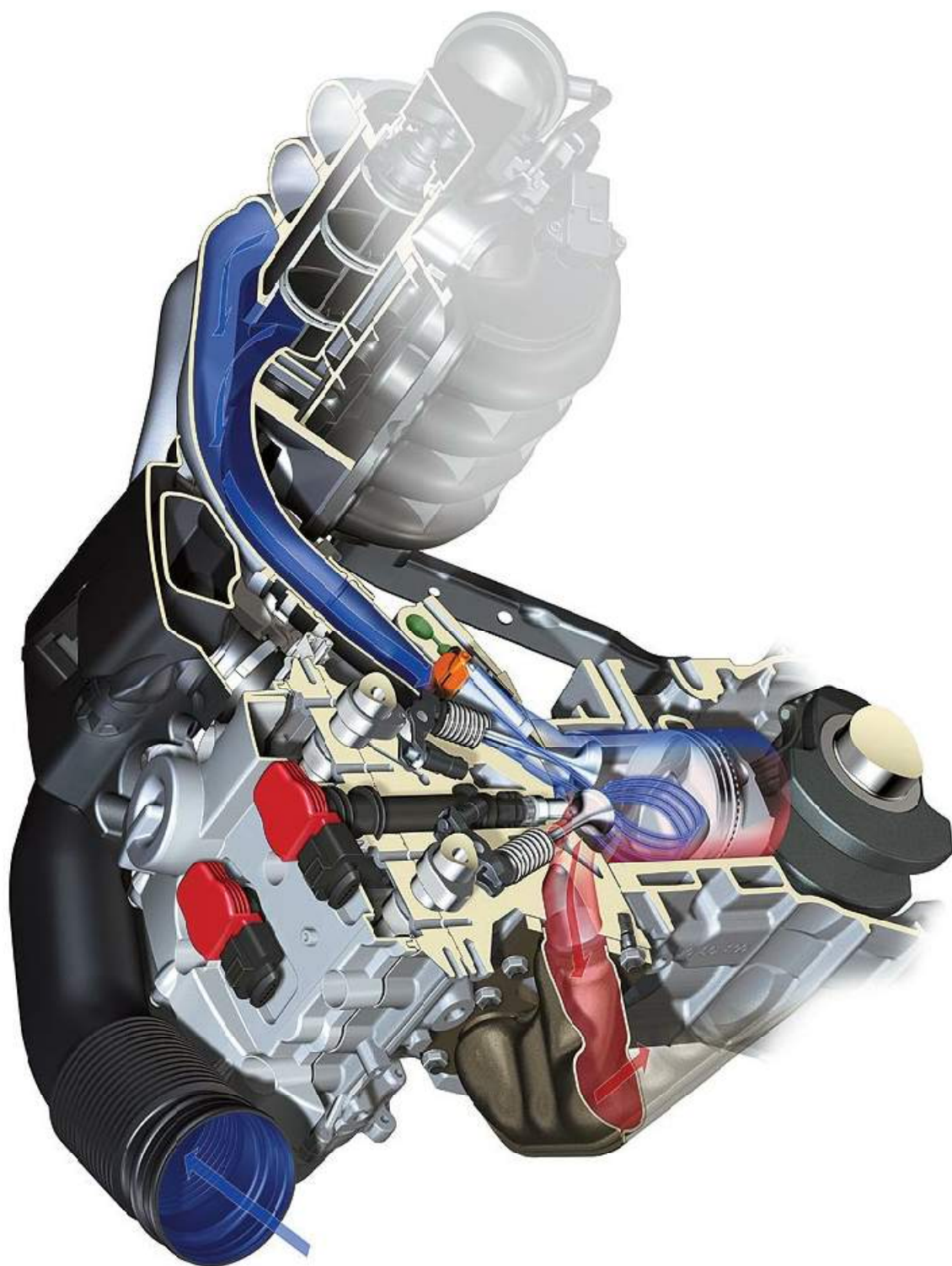
Příloha č.5 Příčný a podélný řez vysokotlakým vstřikovacím čerpadlem BOSCH [19]



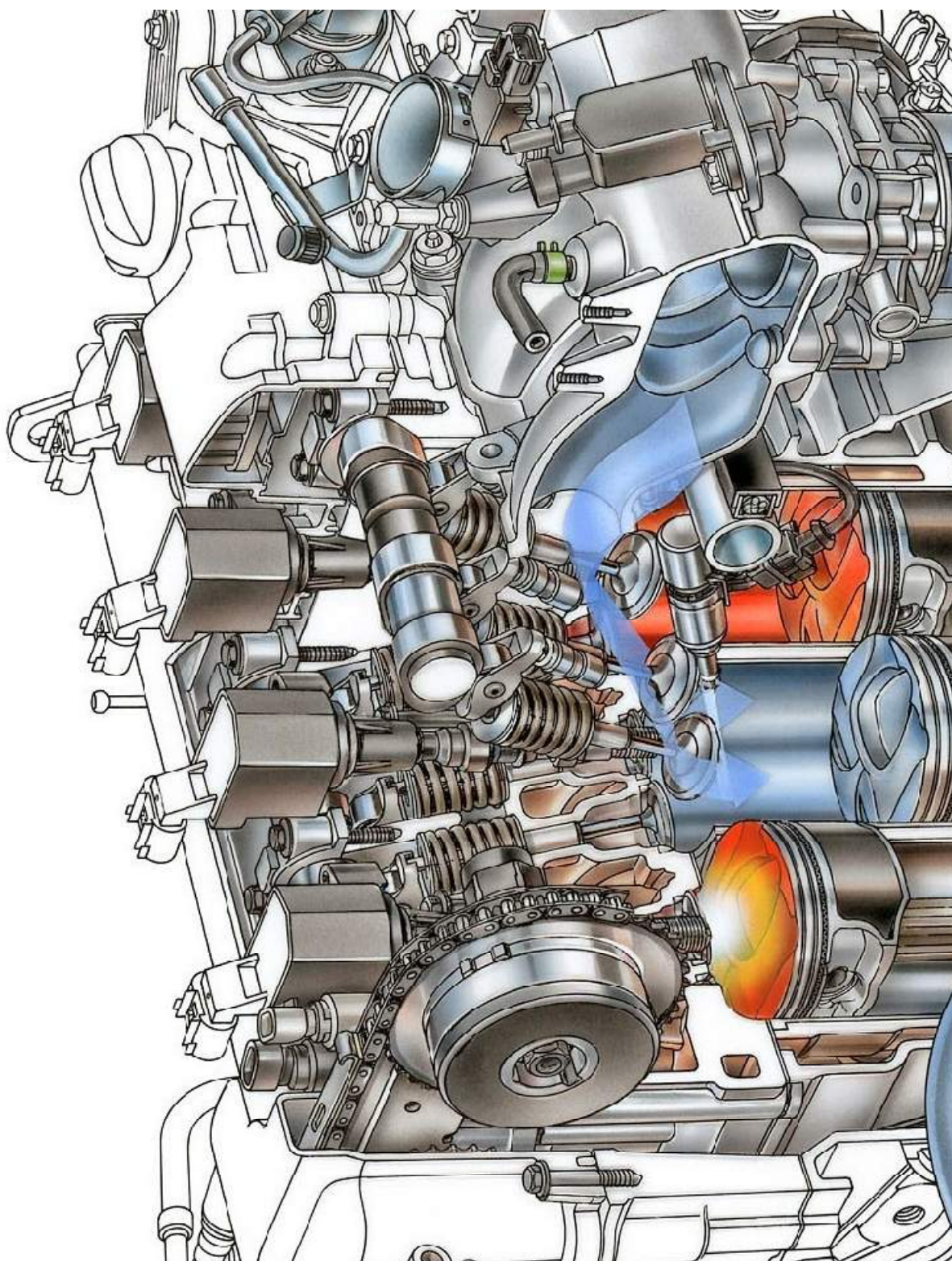
Příloha č.6 Bosch MED7 (FSI) systém Tumble [20]



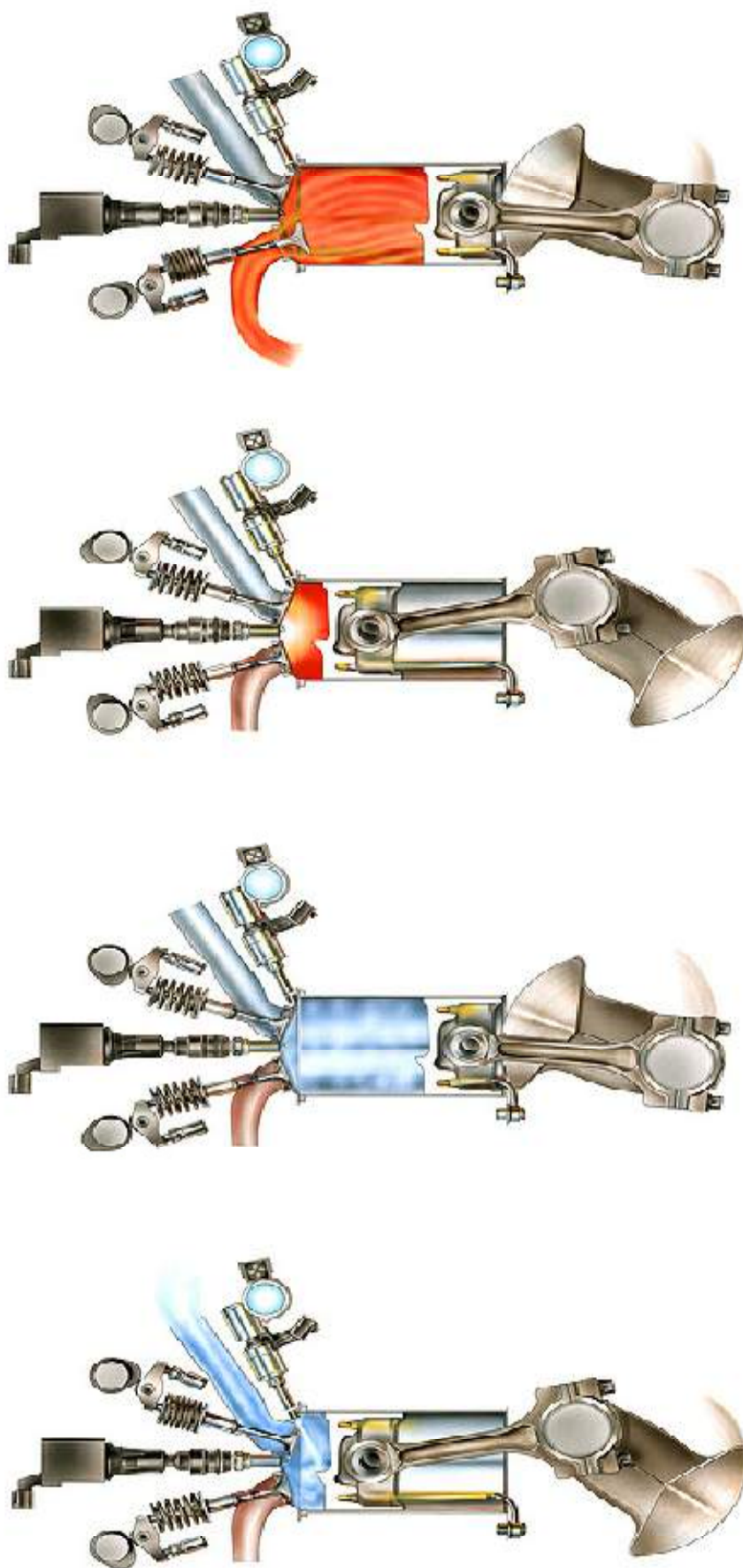
Příloha č.7 Bosch MED7 (FSI) zásobník tlaku paliva, znázornění v řezu motoru[20]



Příloha č.8 Bosch MED7 (FSI) způsob proudění vzduchu[30]



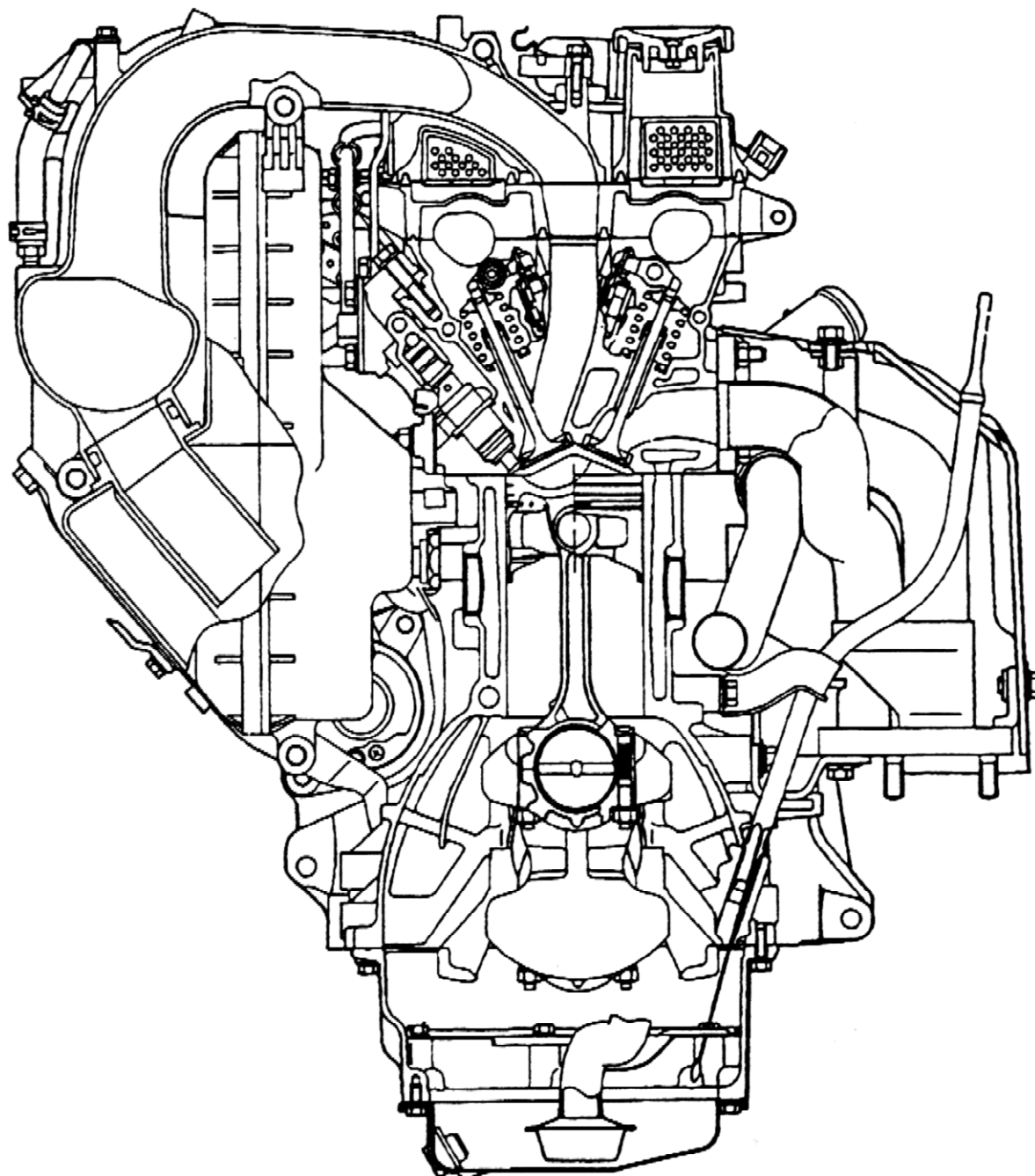
Příloha č.9 Bosch MED7 (FSI) řez motorem [25]



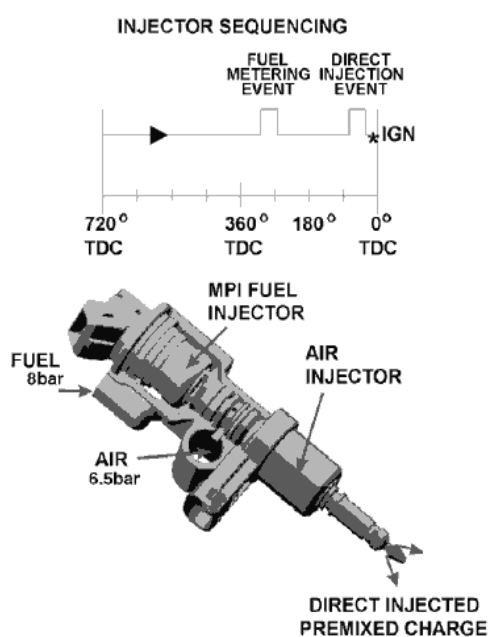
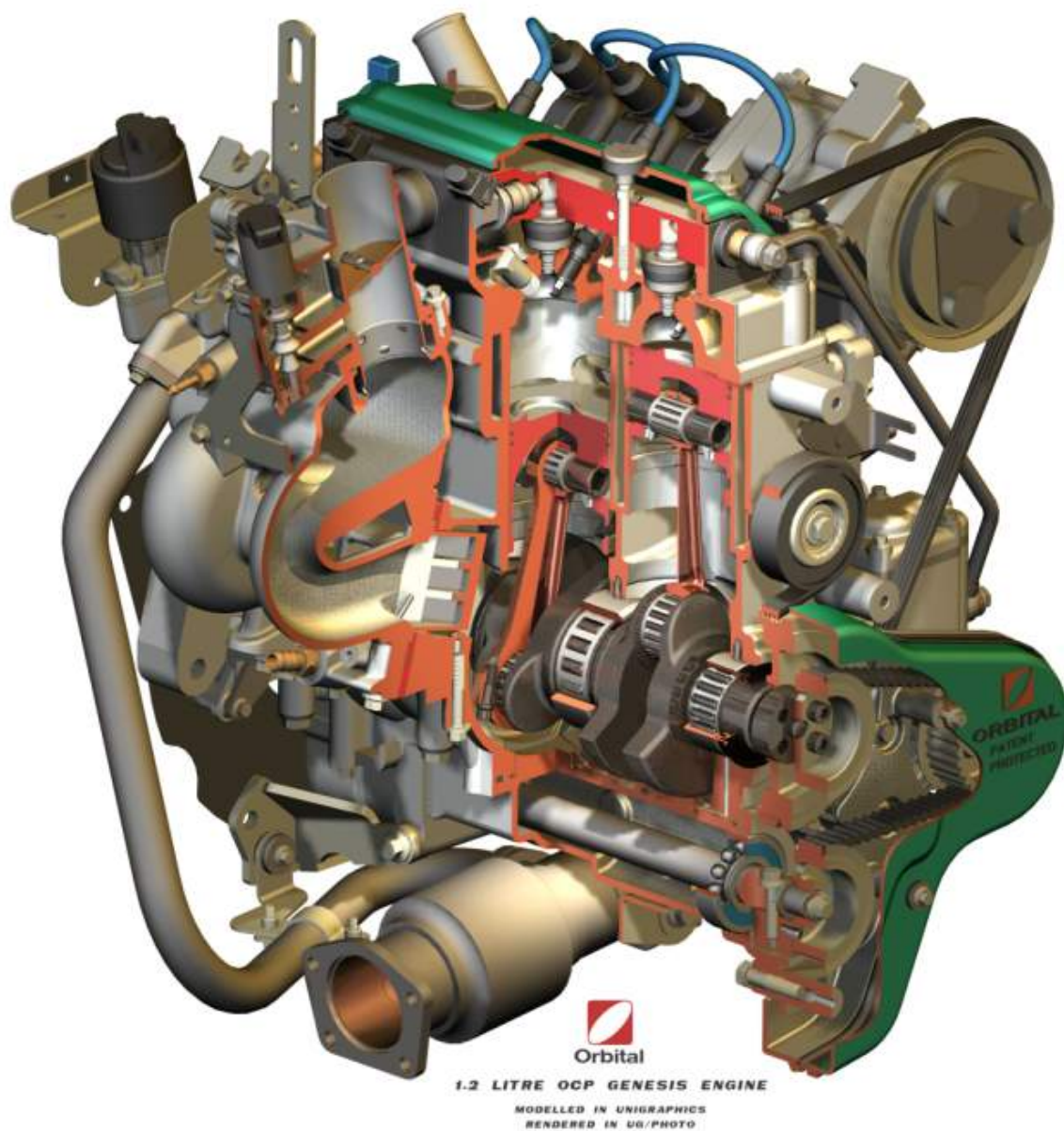
Příloha č.10 Bosch MED7 (FSI) průběh vstřikování paliva [25]



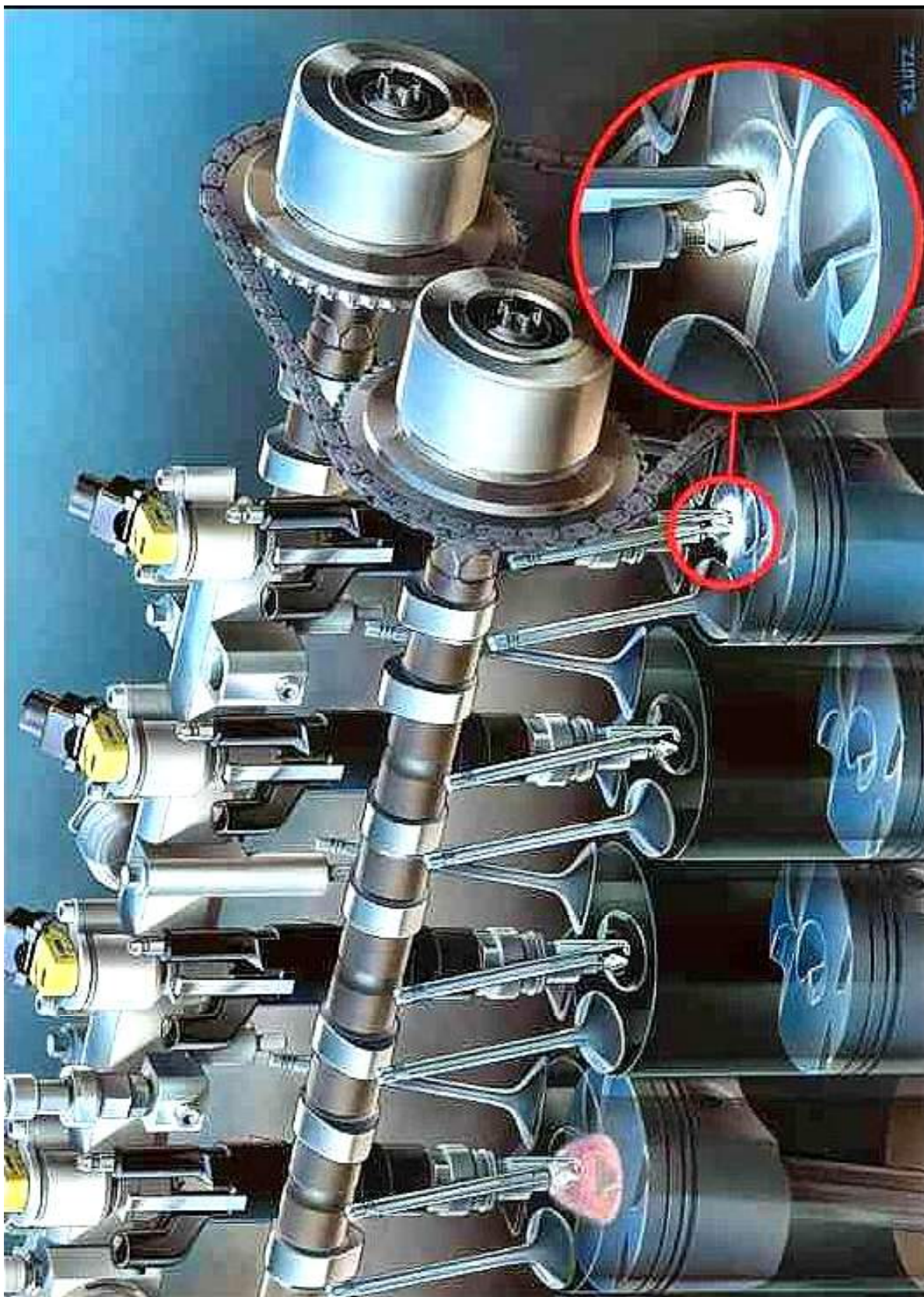
Příloha č.11 Bosch MED7, řez motorem Volkswagen 1,4 FSI [26]



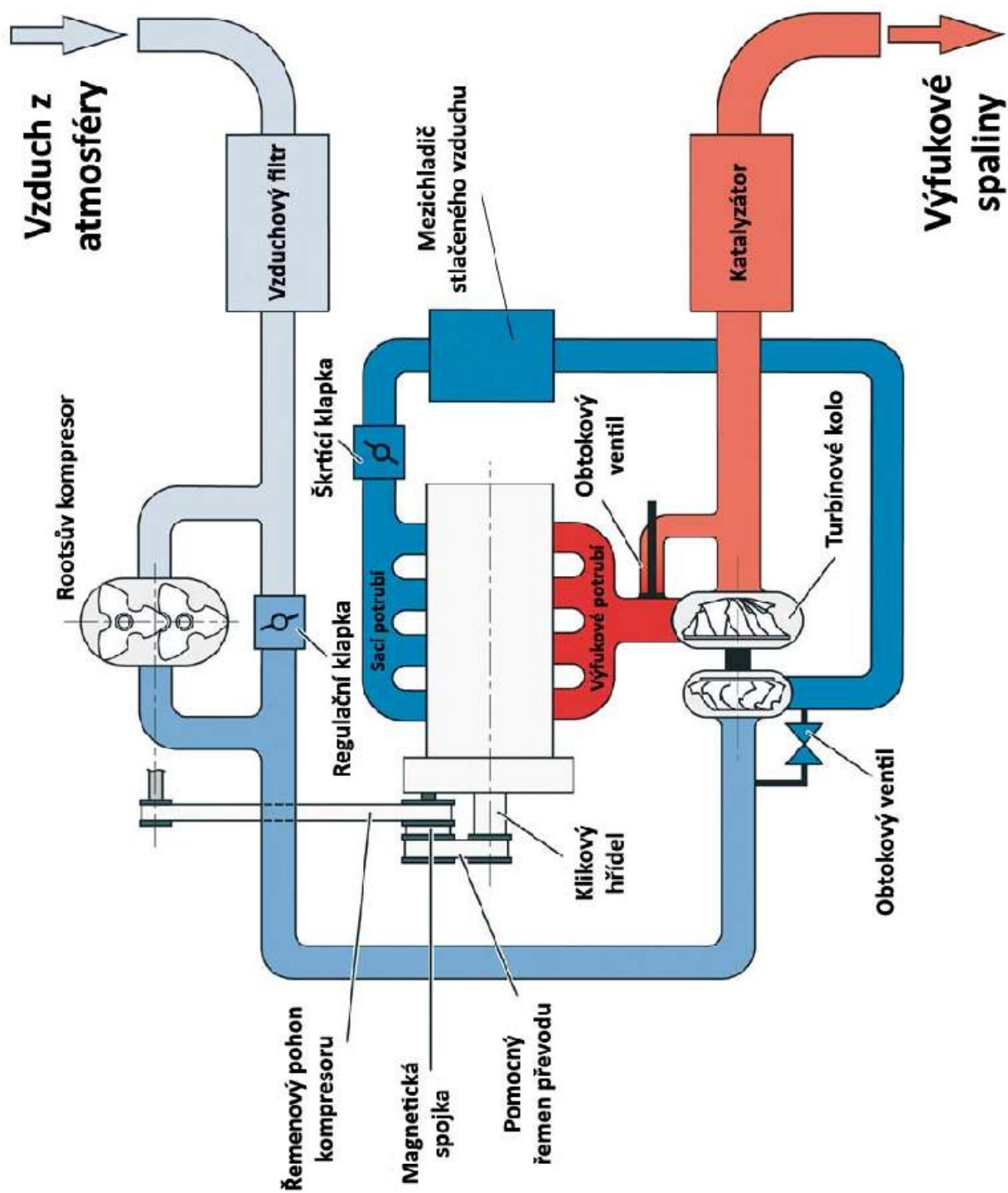
Příloha č.12 Řez motorem Mitsubishi GDI [29]



Příloha č.13 Řez motorem Orbital [9]



Příloha č.14 Systém vstřikování Saab SCC [16]



Příloha č.15 TSI – přeplňování motoru kompresorem a turbodmychadlem [16]