

## PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ BENZINU

*Pro přípravu směsi se dnes místo karburátorů používají vstřikovací systémy, jejichž výhodou je vstřikování paliva v souvislosti s požadavky na hospodárnost, výkonové schopnosti, dokonalé jízdní vlastnosti a nízký obsah škodlivých látek ve výfukových plynech. Vstřikování umožňuje přesné odměřování paliva v závislosti na provozním stavu a zatížení motoru při zohlednění okolních vlivů. Složení směsi je přitom řízeno tak, aby byl nízký podíl škodlivých látek ve výfukových plynech.*

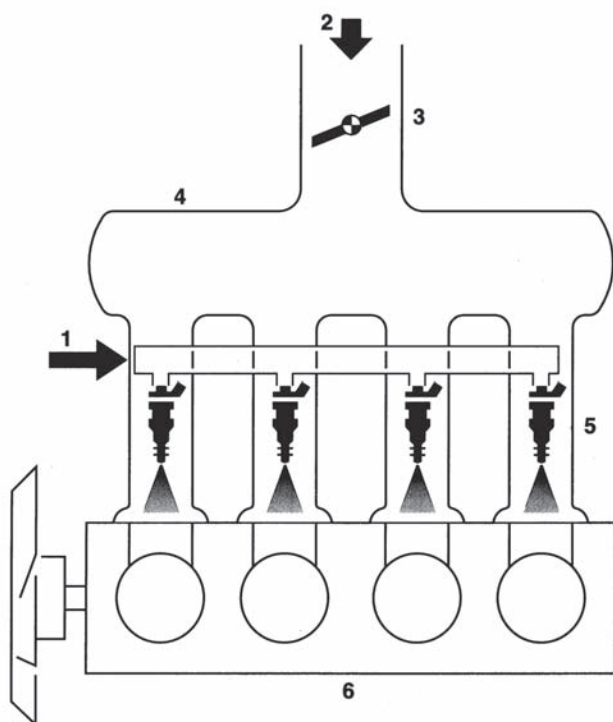
Rozeznáváme tři způsoby vstřikování benzínu: vícebodové vstřikování (nepřímé vstřikování), centrální (bodové) vstřikování (nepřímé vstřikování), přímé vstřikování.

**Vícebodové vstřikování** benzínu (MPI = Multi Point Injection) má ideální předpoklady pro splnění výše popsaných úkolů. U vícebodových vstřikovacích systémů je každému válci přiřazen jeden vstřikovací ventil, který vstřikuje palivo přímo před sací ventil příslušného válce (obr. 1). Příkladem tohoto vstřikování může být KE- nebo L-Jetronic (Bosch) s jejich různými variantami.

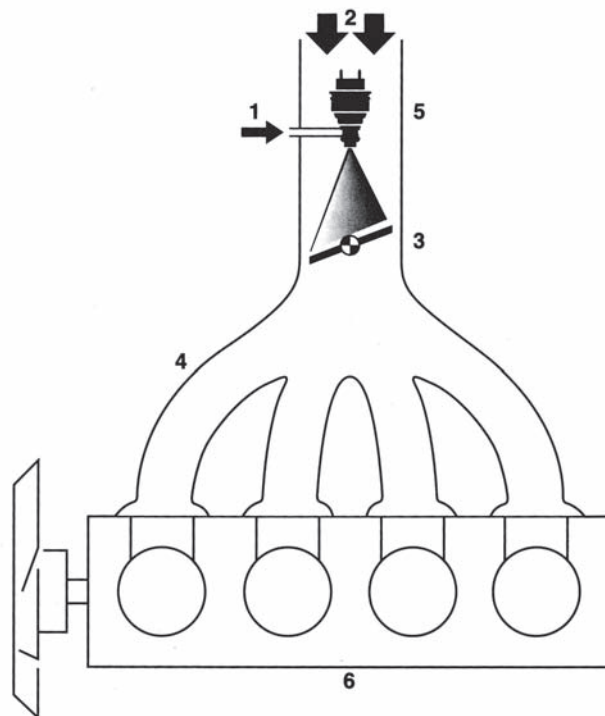
Palivo je vstřikováno do jednotlivých větví sacího potrubí, přičemž vstřikovaný paprsek paliva je usměrněn do oblasti sacího ventilu. Při otevření sacího ventilu strhává proud nasávaného vzduchu obláčky palivových par a následujícím vířením v průběhu

sacího taktu způsobuje tvorbu dobře zapalitelné směsi. Tím je zabezpečeno rovnoměrné naplnění jednotlivých válců motoru palivem a odstraněna kondenzace paliva na studených stěnách sacího potrubí za nízkých teplot. Vstřikování může být kontinuální a přerušované.

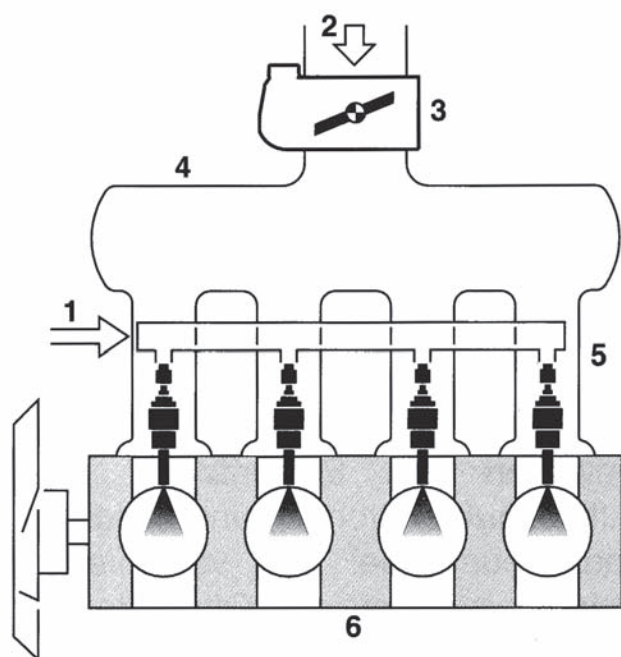
**Centrální vstřikování** benzínu (CFI = Central Fuel Injection) je elektronicky řízený vstřikovací systém, u kterého je palivo vstřikováno přerušovaně do sacího potrubí z jednoho elektromagnetického ventilu na centrálním místě nad škrťací klapkou (obr. 2). Umístění elektromagnetem ovládaného vstřikovacího ventilu odpovídá umístění karburátoru. Palivový paprsek trysky je nasměrován do průtočných průřezů škrťací klapky. Centrální vstřikování benzínu je vhodné pro motory do výkonu 80 kW, mající



Obr. 1 Vícebodové vstřikování benzínu: 1 – palivo; 2 – vzduch; 3 – škrťací klapka; 4 – sací potrubí; 5 – vstřikovací ventily; 6 – motor.



Obr. 2 Centrální (bodové) vstřikování benzínu do sacího potrubí: 1 – palivo; 2 – vzduch; 3 – škrťací klapka; 4 – sací potrubí; 5 – vstřikovací ventil; 6 – motor.



Obr. 3 Přímé vstřikování benzínu: 1 – palivo; 2 – vzduch; 3 – škrticí klapka; 4 – sací potrubí; 5 – vstřikovací ventily; 6 – motor.

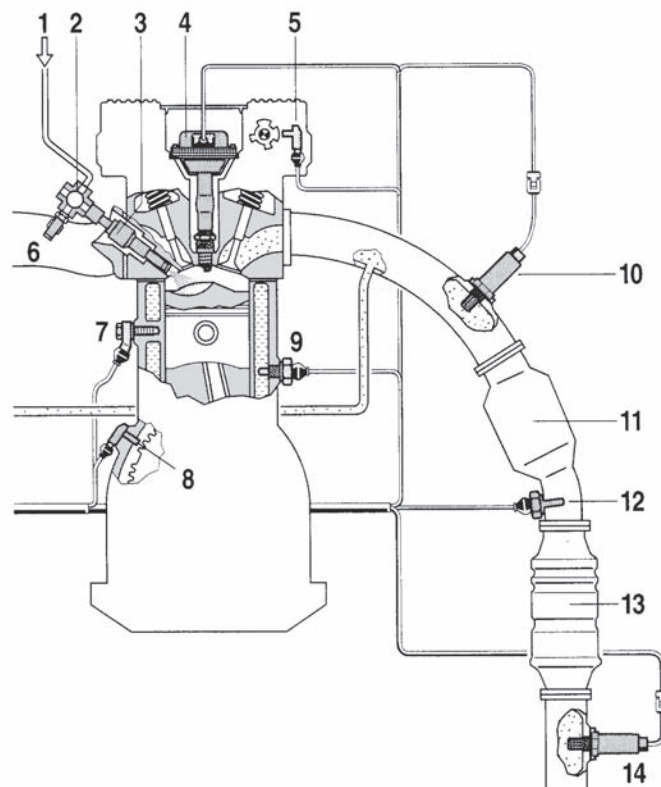
nejvýše čtyři válce. Znamé jsou například systémy Mono – Jetronic a Mono – Motronic (Bosch).

**Přímé vstřikování benzínu** znamená, že je benzin vstřikován přímo do spalovacího prostoru, obr. 3. Systém přímého vstřikování benzínu GDI (Gasoline Direct Injection) představila firma Mitsubishi v roce 1997. Prvním evropským výrobcem systému s přímým vstřikováním paliva je společnost Bosch, která v roce 2000 zavedla systém FSI (Fuel Stratified Injection) ve spolupráci s koncernem Volkswagen do sériové výroby ve voze Lupo FSI 1,4 l. Přímé vstřikování benzínu se zavádí velmi prudce. Ve srovnání s obvyklým vstřikováním paliva do sacího potrubí lze dosáhnout – v závislosti na otáčkách a zatížení – snížení spotřeby paliva o 5 až 40 % při trvalém snížení emisí  $\text{CO}_2$ . Vztaheno na evropský jízdní cyklus lze tak ušetřit až 30 % paliva. Pro přímé vstřikování benzínu je během provozu nutné zajistit přesně vyladěné střídání režimů s vrstvenou směsí a režimů s homogenní směsí.

Dřívějšímu zavedení tohoto způsobu bránilo např. omezení výkonu motoru v provozu s vrstvenou směsí nebo chybějící možnost katalytického zpracování emisí  $\text{NO}_x$  v režimech s velmi chudou směsí. Tyto problémy byly odstraněny a přímé vstřikování získalo velmi dobré předpoklady pro široké využití v moderních zážehových motorech.

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

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



Obr. 4 Systém přímého vstřikování benzínu MED-Motronic (Bosch): 1 – přívod paliva (vysoký tlak); 2 – tlakový zásobník (rail); 3 – vstřikovač; 4 – zapalovací cívka s zapalovací svíčkou; 5 – fázový snímač; 6 – tlakový snímač; 7 – snímač klepání; 8 – snímač otáček; 9 – snímač teploty motoru; 10 – lambda sonda; 11 – trojcestný katalyzátor; 12 – snímač teploty výfukových plynů; 13 –  $\text{NO}_x$  katalyzátor; 14 – lambda sonda.

Mezi systémy přímého vstřikování benzínu patří např. systém Bosch MED Motronic, obr. 4. Systém vysokotlakého vstřikování benzínu je vybaven tlakovým zásobníkem, tj. společným rozdělovacím palivovým potrubím, (podobně jako systém common-rail u vznětových motorů), které je vysokotlakým čerpadlem plněno až na 12 MPa (120 barů). Elektromagnetickými ventily je pak palivo vstřikováno ve správný okamžik přímo do spalovacího prostoru. Hmotnost nasávaného vzduchu je volně nastavitelná pomocí elektronicky ovládané škrticí klapky (EGAS). Pro přesné měření hmotnosti nasávaného vzduchu je použit měřič hmotnosti s vyhřívaným filmem.

Kontrolu složení směsi je zabezpečena pomocí dvou lambda sond umístěných před a za katalyzátorem. Ty slouží k regulaci provozu se součinitelem přebytku vzduchu  $\lambda = 1$  (provoz s homogenní směsí), k provozu s velmi chudou směsí  $\lambda = 1,5$  až 3,0 (provoz s vrstvenou směsí), k provozu s bohatou směsí  $\lambda = 0,8$  a k přesnému řízení regenerace katalyzátoru.

Poblíž motoru se nachází vyhřívaný třicestný (trojsložkový) katalyzátor a poněkud dále ve výfukovém traktu je tzv. zásobníkový katalyzátor  $\text{NO}_x$ . V režimu, kdy motor pracuje s velkým přebytkem vzduchu (vrstvené plnění), se vytváří nutně větší množství oxidů dusíku. Tyto škodlivé emise se shromažďují v druhém katalyzátoru, který je v podstatě zásobníkem  $\text{NO}_x$ . V režimu homogenního plnění motoru se nashromážděné oxidy dusíků redukuje na neškodný dusík. Klíčovou úlohu hraje snímač  $\text{NO}_x$ , který byl firmou Bosch použit

celosvětově vůbec poprvé. Snímač zaregistruje, že zásobníkový katalyzátor je plný oxidů dusíku a dá samočinně povel řídicí jednotce, aby změnila režim z chudého na homogenní plnění. To se odehrává v časových odstupech zhruba jedné minuty.

Regenerace katalyzátoru (přepnutí režimu) proběhne za asi dvě sekundy. Síra obsažená v palivu zanáší zásobníkový katalyzátor a snižuje jeho účinnost. K vyčištění katalyzátoru od síry je potřeba zahřát katalyzátor nad teplotu 650 °C. Při krátkých jízdách, kdy se katalyzátor na takto vysokou teplotu nezahřeje musí zasáhnout snímač NO<sub>x</sub> a regenerace katalyzátoru proběhne změnou tvorby směsi na homogenní režim s hodnotou λ menší než 1. Tím se zvýší teplota na potřebných 650 °C a síra se spálí. Výrobci automobilů se snaží, aby co nejdříve byl u čerpacích stanic benzin s co nejmenším obsahem síry.

Hlavní požadavky kladené na vstříkovací systém, tj. volba okamžiku vstříku pliva a proměnlivý systémový tlak, lze splnit nejlépe použitím vstříkovaní se zásobníkem paliva. Ten umožňuje vstříkovat palivo pod určitým tlakem v zásobníku přes elektromagneticky řízení vstříkovací ventil přímo do spalovacího prostoru. V dalším textu jsou popsány jen ty komponenty, které jsou u přímého vstříkovaní benzínu použity poprvé.

**Nízkotlaký obvod.** Jeho komponenty jsou umístěny převážně v palivové nádrži. Skládá se z palivového čerpadla a paralelně připojeného mechanického regulátoru tlaku paliva, s jejichž pomocí je palivo stlačeno na tlak 0,35 MPa a dopraveno k pístovému palivovému čerpadlu, které je mechanicko poháněno od klikového hřídele.

**Vysokotlaký obvod.** Vysokotlaké palivové čerpadlo má následující úlohy:

- zvýšit tlak paliva z 0,35 MPa až na tlak 12 MPa,
- zajistit co nejmenší kolísání tlaku paliva v zásobníku,
- zajistit provoz výhradně jen na benzin (zabránit jeho smíchání s motorovým olejem).

**Zásobník (rozdělovač) paliva** musí být velmi pružný, aby utlumil tlakové pulzace způsobené jak periodickými odběry paliva, tak i vlastní pulzací proudu paliva ve vysokotlakém čerpadle. Naproti tomu musí být zásobník paliva natolik tuhý, aby tlak paliva mohl být dostatečně rychle přizpůsobován požadavkům motoru. Hodnota tlaku paliva a zásobníku je kontrolována snímačem tlaku paliva. Zvolená pružnost zásobníku paliva vyplývá zejména ze stlačitelnosti paliva a z objemu zásobníku. Zásobník má tvar potrubí, je vyroben z hliníkové slitiny a má otvory pro připojení vstříkovacích ventilů, tlakového řídicího ventilu, vysokotlakého čerpadla a příslušných snímačů.

**Snímač tlaku paliva** měří hodnotu tlaku paliva v zásobníku. Jako snímací prvek slouží odpory, které jsou technikou tenké vrstvy naneseny na nerezovou membránu.

**Tlakový řídicí ventil.** Úkolem tlakového řídicího ventilu je v celkovém provozní rozsahu motoru nastavovat systémový tlak paliva tak, aby odpovídal předepsaným hodnotám v datovém poli charakteristik. Hodnota systémového tlaku paliva závisí na provozním stavu motoru a pohybuje se mezi 5 MPa až 12 MPa. Systémový tlak paliva je přitom nezávislý jak na vstříkovaném. Tak i na vysokotlakém čerpadlem dodávaném množství paliva.

**Vstříkovací ventil** musí splňovat vysoké požadavky s ohledem na podmínku jeho umístění, na krátké doby vstříku, na vysoké rozsah linearitu a na velký význam výpočtu tvaru vstříkovacího

paprsku. Vstříkovací ventily jsou u přímého vstříkovaní benzínu připojené přímo na zásobník paliva. Prostřednictvím řídicího signálu pro vstříkovací ventil je současně určen počátek vstříku a množství vstříkovaného paliva.

Aby bylo možné u přímého vstříkovaní benzínu dosáhnout nízké spotřeby paliva a vysokého výkonu motoru, je nutný komplexní systém řízení motoru. Přitom se rozlišuje mezi dvěma základními způsoby provozu:

- dolní rozsah zatížení,
- horní rozsah zatížení.

V dolním rozsahu zatížení je motor provozován s velmi silně vrstveným plněním válce a s vysokým přebytkem vzduchu. Pomocí pozdějšího vstříku, krátce před okamžikem zážehu, se spalovací prostor rozdělí do dvou oblastí: zapálení schopného oblaku směsi paliva a vzduchu a zapalovací svíčky a izolované vrstvy složené ze vzduchu a zbytkového plynu. Motor je vlivem provozu s vrstvenou směsí regulován kvalitativně, podobně jako motor vznětový – běží s naplno otevřenou škrticí klapkou a při přidání „plynu“ se pouze zvýší množství vstříkovaného paliva.

S rostoucím zatížením motoru a tím rostoucím množstvím vstříkovaného paliva vzrůstá bohatost vrstvené směsi paliva a vzduchu. Tím dochází ke zhoršení emisí výfukových plynů, zejména pokud jde o emise pevných částic (sazí). V tomto horním rozsahu zatížení je proto motor provozován s homogenním plněním válců. Motor v tomto režimu je regulován kvantitativně. Točivý moment motoru odpovídající poloze akceleračního pedálu je nastaven pomocí elektronicky řízené škrticí klapky. Potřebné množství vstříkovaného paliva je vypočítáno z hmotnosti nasávaného vzduchu a korigováno lambda regulací.

Zásobníkový katalyzátor NO<sub>x</sub> je schopen na svém povrchu nashromáždit oxidy dusíku ve formě dusičnanů. Jakmile jsou však jeho akumulární možnosti vyčerpány, musí být regenerován. To se provede krátkodobým přepnutím na provoz s bohatou homogenní směsí, přičemž jsou dusičnany redukovány především pomocí CO na dusík. Lambda sondy před a za katalyzátorem kontrolují hodnoty emisí.

**Spalovací prostor pro přímé vstříkovaní benzínu.** Ve spalovacím prostoru zážehového motoru s **přímým vstříkovaním** je mezi ventily umístěna zapalovací svíčka, po straně pak vstříkovací tryska. Tou se do spalovacího prostoru vstříkuje benzin pod tlakem až 100 barů přímo do vybrání v pístu. Speciálně tvarovaný spalovací prostor vytváří spolu tvar hlavy válců a vrchní části pístu. Sací kanál může být opatřen speciální klapkou, která ho vlastně dělí na dvě části – spodní a vrchní polovinu. Účelem této klapky je vytváření **vrstveného plnění**.

Pro správné spalování zážehových motorů je důležitá homogenní směs paliva se vzduchem. Průběh spalování lze zlepšit, dojde-li při plnění válce k cílenému **rozvrstvení paliva**.

Výhodou tohoto způsobu plnění je, že se v blízkosti zapalovací svíčky nachází bohatá směs, kterou lze velmi dobře zapálit, hlavní průběh spalování poté probíhá v chudé směsi. Zvláště výhodná (ale velmi náročná) je realizace tohoto způsobu prostřednictvím děleného spalovacího prostoru, kde by byla do komůrky vstříkována bohatá směs připravovaná druhým systémem přípravy směsi. Tento systém je výhodný díky velmi dobré zápalnosti směsi, i když se ve spalovacím prostoru nachází směs chudá. Zároveň lze dosáhnout velmi nízkých hodnot emisí NO<sub>x</sub>, protože dochází ke spalování

velmi chudé a bohaté směsi. Díky velké povrchové ploše spalovacího prostoru mají motory s rozděleným spalovacím prostorem, v porovnání s motory s otevřeným spalovacím prostorem, výrazně vyšší hodnoty emisí nespálených uhlovodíků.

Rozvrstveného plnění spalovacího prostoru lze dosáhnout přímým vstříkem paliva do spalovacího prostoru. Zde se dosáhne v oblasti zapalovací svíčky velmi bohatá směs, při celkově chudém složení směsi ve spalovacím prostoru (podobně jako u vznětových motorů). Rozvrstvení paliva lze dosáhnout také cíleným ovlivnění pohybu směsi při jejím proudění do spalovacího prostoru.

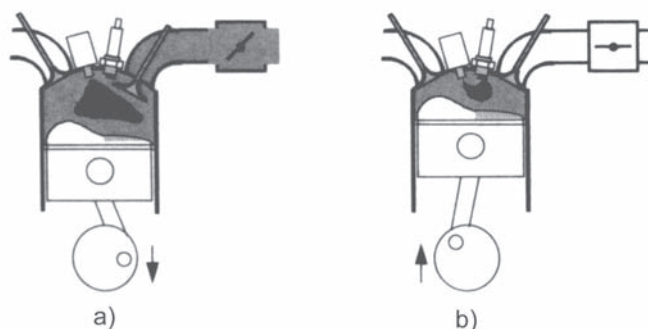
**Vrstvené plnění** znamená výraznou úsporu paliva. Když stoupne zatížení a otáčky motoru, začne motor nejprve pracovat v režimu chudého plnění ( $\lambda \approx 1,5$ ), tj. režim s vrstvenou směsí. Klapka tumble se elektronickým řízením otevírá, až je nakonec sací kanál volný v plném průřezu ( $\lambda \leq 1$ , tj. směs vzduch/palivo v poměru  $\leq 14,7:1$ ), tj. režim s homogenní směsí. Tento režim vystačí i pro nejvyšší otáčky.

U **přímého vstříkávání** benzínu je palivo vstříkováno v průběhu sacího a kompresního zdvihu přímo do **vzduchové náplně** válce, přičemž se rozprašuje a odpařuje ještě **před zážehem** jiskrou svíčky.

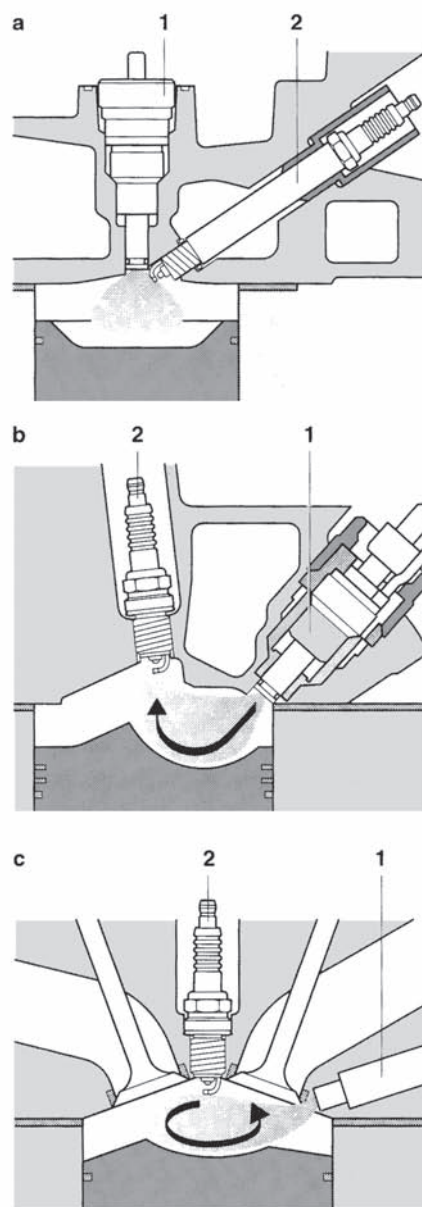
**Sací kanály** jsou téměř svislé, aby se dosáhlo cíleného směru proudění nasávaného vzduchu. Používají se **tvarové píсты** (deflektor, vybrání) pro usměrnění pohybujícího se vzduchu a směsi paliva se vzduchem v oblasti částečného a plného zatížení.

**Přímé vstříkávání benzínu ve výkonném režimu** (obr. 5a). V horní oblasti zatížení motoru je množství vzduchu určováno polohou škrticí klapky v sacím potrubí. Palivo je v době sání vstříkováno vířivou tryskou v širokém kuželu, přičemž se zlepšuje vnitřní chlazení a stupeň plnění. V průběhu kompresního zdvihu tlačí tvarový píst **homogenní směs** paliva se vzduchem k zapalovací svíčke, kde proběhne zážeh. Elektronická regulace zapalování a přímé vstříkávání benzínu zaručuje plynulý přechod z režimu provozu s chudou směsí s vrstveným plněním k režimu provozu s plným zatížením v oblasti stechiometrického směšovacího poměru (1:14,8), bez vynechání zážehů.

**Přímé vstříkávání benzínu v úsporném režimu** (obr. 5b). V oblasti částečného zatížení motoru, ve kterém se jezdí nejvíce, pracuje motor s velmi chudou směsí (součinitel přebytku vzduchu  $\lambda \approx 2,7$  až 3,4). Tomu odpovídá směšovací poměr 1:40 až 1:50, který je pod mezí zápalnosti. Proto se při sání proud vzduchu uvádí do **točivého pohybu**. V době stlačování se tento proud vzduchu vychyluje tvarovým dnem pístu (deflektorem s prohlubní). Dosahuje

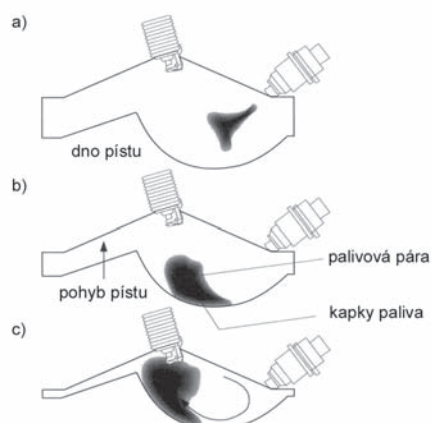


Obr. 5 Provoz motoru s homogenním nebo vrstveným plněním:  
a – homogenní (pro velké zatížení motoru, škrtení vzduchu, dřívější vstříkávání během sání); b – vrstvené (pro malé zatížení motoru, bez škrtení vzduchu, pozdější vstříkávání během komprese).

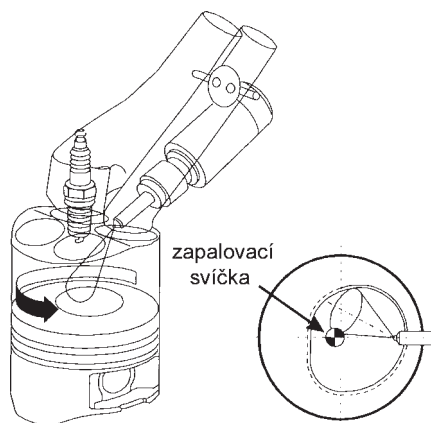


Obr. 6 Systémy tvoření směsi přímého vstříkávání benzínu (vždy podporováno vířením nebo tumble-efektem): a – spalování řízené paprskem; b – spalování řízené stěnou; c – spalování řízené vzduchem; 1 – vstříkovací ventil; 2 – zapalovací svíčka.

se šroubového pohybu vzduchu ve válci. Do takto rozvířeného vzduchu je ke konci doby komprese, krátce před HŮ, vstříknuto minimální potřebné množství paliva. Pomocí **vířivé vstříkovací trysky** je palivo velmi jemně rozprašeno. Šroubový pohyb vzduchu a vhodně směřovaný výstřik tryskou rozprašeného paliva vytváří ve válci vrstvy s různými směšovacími poměry, tzv. **vrstvené plnění**. V okolí zapalovací svíčky je bohatá směs paliva se vzduchem, která je obklopena chudými vrstvami. Vnější vrstvy se mohou skládat z čistého vzduchu a nehořlavých horkých výfukových plynů zpětného vedení (recirkulace výfukových plynů). Bohatá směs paliva se vzduchem v oblasti zapalovací svíčky se bezpečně zažehne jiskrou a hořící palivo zapálí bez problému okolní chudou směs, což zaručuje stabilní a čisté spalování. Při chodu naprázdno a nízkém zatížení je vzduch nasáván obtokem škrticí



Obr. 7 Reverzní „tumble“ u spalování řízeného stěnou: a) vstřikování paliva do prohlubně pístu; b) dopad obláčky paliva na povrch prohlubně pístu; c) odpařování paliva a doprava paliva k zapalovací svíčce (metoda spalování řízená stěnou).



Obr. 8 Vytvoření víru u spalování řízeného stěnou.

klapky (zamezí se ztrátám škrcením na málo otevřené škrtkové klapce).

Pro **přímé vstřikování benzínu** se používají tři metody spalování (obr. 6):

- spalování řízené paprskem,
- spalování řízené stěnou,
- spalování řízené vzduchem.

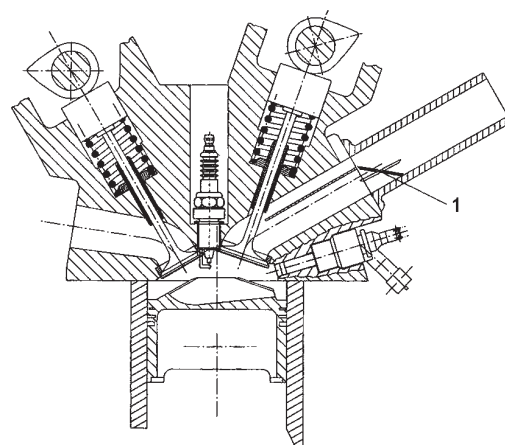
Různé metody spalování při přímém vstřikování benzínu znázorňují obr. 7 až 9.

**Elektronický systém řízení** moderního zážehového motoru spojuje v jedné řídicí jednotce kompletní elektroniku řízení zážehového motoru (řízení zapalování a vstřikování). Pomocí snímačů na motoru jsou získávána provozní data, např. spínací vstupy jako:

- zapalování (zapnuto/vypnuto),
- poloha vačkových hřídelů,
- rychlost jízdy,
- zařazený rychlostní stupeň,
- zásah převodovky,
- klimatizace atd.,

nebo analogové hodnoty jako:

- napětí akumulátoru,
- teplota motoru,
- teplota nasávaného vzduchu,



Obr. 9 Přímé vstřikování benzínu – spalování řízené vzduchem.

- množství vzduchu,
- úhel natočení škrtkové klapky,
- lambda sonda,
- snímač klepání,
- otáčky motoru.

Vstupní obvody v řídicí jednotce upravují tato data pro mikroprocesor. Ten zpracovává uvedená data, rozpoznává z nich provozní stav motoru a vypočítává potřebné ovládací signály. Koncové stupně zesilují tyto signály, ovládají posléze akční členy, jež řídí provozní stav motoru. Tím je dosaženo optimálního spolupůsobení vstřikování, optimální přípravy směsi a její zapalování ve správný okamžik při rozličných provozních stavech zážehového motoru. Základní funkcí elektronického řízení zážehového motoru je řízení vstřikování a zapalování. K tomu je nutno snímat různá provozní data a zpracovávat je.

Přídavné řídicí a regulační funkce jsou nutné ke snížení emisí a spotřeby paliva. Tyto funkce rozšiřují základní systém řízení motoru (vstřikování a zapalování) a sledují všechny důležité vlivy na složení výfukových plynů, jako např.:

- regulace otáček chodu naprázdno (volnoběžných otáček),
- lambda regulace,
- řízení systému odvětrání palivové nádrže,
- regulace klepání,
- recirkulace spalin ke snížení oxidů dusíku  $\text{NO}_x$ ,
- řízení vhánění sekundárního vzduchu ke snížení obsahu uhlovodíků HC,
- řízení turbodmychadla a sacího potrubí s proměnnou délkou k regulaci nárůstu výkonu motoru,
- řízení nastavení vačkových hřídelů ke snížení emisí ve výfukových plynech jakož i regulaci nárůstu výkonu motoru,
- regulace klepání a omezení maximálních otáček a omezení maximální rychlosti vozidla potřebné k ochraně motoru a vozidla.

## LITERATURA

- [1] VLK, F.: Automobilová technická příručka. Vlastním nákladem, Brno, 2003.
- [2] VLK, F.: Vozidlové spalovací motory. Vlastním nákladem, Brno, 2003.