VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

VYSOKOTLAKÉ VSTŘIKOVACÍ SYSTÉMY
HIGH PRESSURE INJECTION SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Roman Břoušek**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Radim Dundálek, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	**Roman Břoušek**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	**Ing. Radim Dundálek, Ph.D.**
Akademický rok:	2019/20

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:

Vysokotlaké vstřikovací systémy

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

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

Cíle bakalářské práce:

Uvedení přehledu klíčových prvků systémů pro vysokotlaké vstřikování benzínu a nafty, popis jejich konstrukčního řešení. Výhody a nevýhody s ohledem na provozní spolehlivost a životnost. Příklady řešení systému u konkrétních pohonných jednotek.

Seznam doporučené literatury:

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

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá vysokotlakými vstřikovacími systémy zejména pro osobní automobily. Cílem bylo popsat soustavu přímého vstřikování na konkrétních pohonných jednotkách společně se způsoby snižování emisí a jejich nejčastějších závad. Postupně jsou v práci popsané části vysokotlakého vstřikování včetně jejich funkce. Při porovnání současných soustav přímého vstřikování benzinu i nafty si lze všimnout jejich vzájemné podobnosti z hlediska funkce. Závěrem je vhodné zmínit nástup elektrifikace a tím i vývoj vstřikovacích soustav, který je s kombinací finančního a technologického hlediska na ústupu.

KLÍČOVÁ SLOVA

vysokotlaké vstřikování paliva, přímé vstřikování benzinu, common rail, vysokotlaké palivové čerpadlo, vysokotlaký palivový zásobník, vysokotlaké vstřikovače, redukce emisí, TSI, BlueHDI

ABSTRACT

This thesis is based on high pressure injection systems mostly for commercial vehicles. The aim is to describe direct injection systems on specific drive units with methods of reducing emissions and their common issues. Gradually, the parts of injection system are described including their function. By comparing direct injection systems of gasoline and diesel similarities can be notice by aspect of their function. Finally is good to mention onset of electrification and thus development of injection systems, which are retreat by combination of financial and technological aspects.

KEYWORDS

high pressure fuel injection, gasoline direct injection, common rail, high pressure fuel pump, high pressure fuel rail, high pressure injectors, reduction of emissions, TSI, BlueHDI

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BŘOUŠEK, Roman. *Vysokotlaké vstřikovací systémy*. Brno, 2020. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124551. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 49 s. Vedoucí diplomové práce pan Radim Dundálek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. června 2020 ……..……..……..

Jméno a přímení

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Radimu Dundálkovi Ph.D. za vstřícné a ochotné jednání včetně připomínek a rad při tvorbě této práce.

OBSAH

Úvod 9
1 Nástup vysokotlakého vstřikování 10
1.1 Emise spalovacích motorů 11
1.2 Výzkum vlivu složení paliva na emise vozidel 12
2 Zážehový motor s přímým vstřikováním 13
2.1 Činnost vstřikovací soustavy a konstrukce 13
2.2 Způsoby redukce emisí zážehových motorů s přímým vstřikem 18
2.3 Nejčastější poruchy 20
3 Vznětový motor s přímým vstřikováním 21
3.1 Činnost přímého vstřikování common rail a konstrukce 21
3.2 Způsoby redukce emisí vznětových motorů s přímým vstřikem 26
3.3 Nejčastější poruchy 27
4 Škoda TSI EA211 28
4.1 Části systému vstřikování 29
4.2 Emisní limity a způsoby jejich plnění 32
4.3 Spolehlivost 33
5 PSA 1.5 BLUEHDI 34
5.1 Části systému vstřikování 35
5.2 Emisní limity a způsob jejich plnění 39
5.3 Životnost a spolehlivost palivové soustavy 40
Závěr 41
Použité informační zdroje 42
Seznam použitých zkratek a symbolů 49

ÚVOD

Práce je zaměřená na moderní způsoby vstřikování paliva a ovlivnění emisí, spalování, spolehlivost a údržbu motorů využívaných především v osobních automobilech. Cílem je popsat současné vysokotlaké vstřikování na konkrétním zážehovém a vznětovém motoru. Postupně je v práci popsán důvod využívání těchto systémů, konstrukce, princip, emise a spolehlivost.

Spalovací motory pracují na principu hoření směsi paliva a vzduchu ve válci. Podle přípravy směsi se palivo vstřikuje do válce, sacího potrubí nebo komůrky. Každá z těchto forem vstřikování má svá omezení, vliv na spalování a emise. Dříve používané nepřímé vstřikování u zážehových motorů zajišťovalo zejména velmi dobrou spolehlivost. Z důvodu snižování emisí a spotřeby paliva se dnes přednostně využívá přímé vstřikování. Technologií v oblasti elektronické regulace narostl i celkový vyprodukovaný výkon motoru. Vznětové motory využívají přímého vstřiku o dost déle než zážehové. Dnes se přednostně jak u zážehového, tak vznětového motoru využívá vstřikování s tlakovým zásobníkem, jenž umožňuje uchovat palivo při přetlaku pro všechny vstřikovače současně. Pomocí moderních vstřikovačů se schopností vícekrát vstříknout palivo za kratší čas lze dosáhnout tichého chodu, nízké spotřeby paliva a škodlivin ve výfukových plynech.

Systém vstřikování paliva prochází stejným technickým vývojem, který se snažíme neustále zdokonalovat v závislosti na podmínkách spalování a požadovaných emisích. Modernímu vstřikování se už nevěnuje taková pozornost jako na přelomu desetiletí. Důvodů je mnoho a jeden z nich je snaha rozšířit elektrifikaci zejména v Evropě.

1 NÁSTUP VYSOKOTLAKÉHO VSTŘIKOVÁNÍ

Proces spalování probíhá velmi složitě a v pístových motorech se podmínky pro tento děj mění. Jedny z těchto podmínek je složení směsi, teploty, tlaky, příprava směsi a další. Z hlediska uvolnění tepla lze rozdělit proces spalování na přípravnou fázi a hoření. V přípravné fázi probíhají současně fyzikální pochody (odpařování paliva, tvorba směsi difuzí a turbulentním pohybem, a první chemické reakce složek paliva bez výrazného vývoje tepla). Hoření probíhá až po minimálně lokálním vytvoření podmínek pro dostatečně rychlé chemické reakce paliva s kyslíkem. [1]

U zážehových motorů historické konstrukce byly hojně využívány karburátory. Je to přístroj, jenž měl za účel dopravit a smíchat palivo se vzduchem. Palivo se nasávalo pomocí podtlaku ze sacího potrubí. Teklo do sání prakticky pořád a díky tomu se motory s karburátory vyznačovaly vysokou spotřebou. Nicméně ani následné snahy o elektrifikaci řízení karburátorů se nejevily jako správná cesta a na řadu nastoupilo nepřímé vstřikování. Rozdíl je zejména ve způsobu ovládání paliva, kdy všechny následné systémy vstřikují benzin při přetlaku. Nepřímé jednobodové vstřikování využívá jeden vstřikovač v sacím potrubí. Tím se zamezuje kontinuální dávky paliva. Vícebodové nepřímé vstřikování dále řeší na rozdíl od jednobodového a karburátoru problém rovnoměrnosti dávky paliva k jednotlivým válcům. Vstřikovače tohoto systému jsou umístěné v sacím potrubí nad sacími ventily. Do každého válce se tedy dostane požadované množství paliva.

Obr. 1 Rozdíl mezi nepřímým a přímým (GDI) vstřikováním [2]

Vznětové motory z principu vznícení nafty využívaly nepřímé do prostoru spojeného s válcem. Vstřikování do komůrky umístěné v hlavě válců, která je spojena s válcem prostřednictvím kanálu. V průběhu komprese je do komůrky vtlačován vzduch a stlačováním se zvyšuje teplota, která snižuje prodlevu vznícení vstřikovaného paliva. Vysoká teplota a nedostatek kyslíku vyvolají krakování paliva, které vede k pomalému spalování. Nárůstem tlaku v průběhu vznícení se směs vytlačí vysokou rychlostí přes spojovací kanál do válce. Vytlačení směsi způsobí silné víry a krakované palivo shoří bez vytvoření sazí. Pomalé spalování a tepelné namáhání spojovacího kanálu způsobilo přechod na přímé vstřikování. [3]

Obecně automobilní průmysl čerpal technologický postup z letadel za druhé světové války. Existovala spousta možností jak motor konstruovat z hlediska vstřikování, přeplňování, atd. První automobil vybaven přímým vstřikováním byl Mercedes Benz 300SL. Jednalo se o systém firmy Bosch v roce 1951. Během let se systémy zdokonalovaly především v oblasti měření nasávaného vzduchu a ovládání dávky paliva. Roku 1998 firma Mitsubishi zavedla do modelů Galant/Legnum přímé vstřikování paliva pod zkratkou GDI. Po roce licenci odkoupila firma PSA a BMW. Následně VW představili svůj systém přímého vstřikování, jenž byl v podstatě stejný jak GDI od Mitsubishi. [4][5]

Zásadní informací pro nejideálnější velikost a délku vstřiku paliva je stechiometrický poměr. Uvádí hmotnost vzduchu pro ideální spálení 1kg paliva. Při dosažení této hodnoty shoří všechno palivo beze zbytku nevyužitého kyslíku a teoreticky vzniká pouze CO_2. Výpočet ideálního poměru probíhá v řídicí jednotce motoru, která pomocí lambda sondy ve výfukovém potrubí získá informaci o zbytkovém kyslíku v plynech. Ta následně provádí korekci dávky paliva vzhledem k dalším zásadním faktorům jako například teplota motoru a zatížení. [6]

1.1 EMISE SPALOVACÍCH MOTORŮ

Automobily poháněné pístovými spalovacími motory využívají převážně palivo složené z uhlovodíků, jeho spalováním vzniká obrovské množství oxidu uhličitého. Z jedné tuny uhlovodíkového paliva vznikne spálením přibližně 3 tuny CO_2, který se podílí na intenzifikaci skleníkového efektu. Nicméně reálně při spalování uhlovodíkového paliva jsou ve výfukových plynech v jisté míře přítomny další látky. Zejména vodní pára, dusík a v menších koncentracích látky, které jsou klasifikovány jako toxické pro živé organismy. Obecný pojem pro všechny takové chemické sloučeniny jsou emise. [1]

Nepravidelné podmínky pro ideální spalování způsobuje vznik škodlivých látek ve výfukových plynech. U spalovacích motorů se konkrétně jedná o oxid uhelnatý, oxidy dusíky, nespálené uhlovodíky a pevné částice (s přímým vstřikováním paliva).

Oxid uhelnatý (CO)
Vzniká při přebytku paliva, kdy má směs málo kyslíku. Nedochází k přeměně CO_2 na H_2O. Tedy primárně závisí na složení směsi, která je daná poměrem vzduchu a paliva. Tato látka je pro člověka toxická.

Oxidy dusíku (NO_X)
Hromadné označení pro oxid dusnatý, oxid dusičitý a oxid dusný. Tyto oxidy jsou závislé na teplotě spalování, tlaku a vznikají oxidací dusíky z atmosféry. Napomáhají ke tvorbě kyselých dešťů a pro člověka jsou také toxické.

Nespálené uhlovodíky (HC)
Sem se řadí parafíny, olejniny a aromáty, které se podobně jako oxidy uhelnaté vytváří při nedokonalém spálení paliva. Tedy nedostatku kyslíku ve směsi. Faktory pro tvorbu uhlovodíků jsou zhasnutí zapálené směsi, nedostatečná energie elektrického výboje při zážehu nebo nerovnoměrné rozložení směsi ve válci. Uhlovodíky jsou ve velké míře karcinogenní a toxické.

Pevné částice PM (saze)
Složením z velké části je uhlík se společnou kombinací síranů. Vznikají nespálenou dávkou paliva u motorů s přímým vstřikováním. Při velké koncentraci jsou lidským okem pozorovatelné. Inhalací částice prochází dýchacími cestami až do plic. Zde jsou v závislosti na jejich velikosti vstřebávány do krve nebo zachycovány na povrchu. Řadí se mezi rakovinotvorné látky.

Výfukové plyny obsahují další chemické sloučeniny, které jsou z obecného hlediska zanedbatelné. Měřící proces probíhá sondou vloženou do vyústění výfukové soustavy. Vyhodnocují se tři složky vyjmenované výše a s rostoucím využitím přímého vstřikování i obsah pevných částic. [7][1][8]

1.2 VÝZKUM VLIVU SLOŽENÍ PALIVA NA EMISE VOZIDEL

Jedná se o souhrn výsledků evropské studie Auto-Oil Programme, monitorující znečištění ovzduší zejména velkoměst v různých místech Evropy. Studie obsahuje mnoho monitorujících oblastí. Za zmínku stojí studie v oblasti technických možností výroby ekologických motorů a paliv, na základě které jsou vydávány přísnější legislativní požadavky na jejich vlastnosti.
Složení paliva a vlastnosti některých látek:

1. Olovo - Dříve se využívalo zejména u motorů se zvýšenou kompresí, jelikož benzin měl schopnost samozápalu. Dnes se používají zejména bezolovnaté benziny kvůli negativnímu ovlivňování životnosti katalyzátoru a zejména škodlivosti vůči životnímu prostředí a zdraví živých organismů. Náhradou za olovo byla vyvinuta aditiva splňující všechna pozitiva olova při spalování.

2. Síra - Přítomnost zvyšuje obsah oxidu siřičitého ve výfuku a zhoršuje účinnost katalyzátoru. Snížením obsahu síry u vznětových motorů se sníží počet pevných částic. Dnes je obsah síry v palivu dán evropskou směrnicí.

3. Kyslík - Zvýšením obsahu kyslíkatých látek v benzinu má stejný vliv jako zvyšování množství spalovacího vzduchu. Výrazně snižují emise CO a u vozidel s katalytickým reduktorem i uhlovodíky, ale zvyšuje obsah aldehydů.

4. Polyaromáty - Snížením obsahu v motorové naftě se dosáhne redukce obsahu CO, HC a výrazně i pevných částic. Stejný efekt nastává v případě zvýšením cetanového čísla (na 55) nebo snížením hustoty nafty (na 820 kg/m^3). [1]

Nutno podotknout, že obsah výše uvedených látek není vždy stejný a samotná paliva se mohou lišit. Vliv obsahu látek je neustále ve formě výzkumu a jejich vlastnosti jsou nadále testovány.

2 ZÁŽEHOVÝ MOTOR S PŘÍMÝM VSTŘIKOVÁNÍM

Přímé vstřikování paliva umožňuje ignorovat ztráty způsobené škrcením v sání. Účinnost motoru je tedy v porovnání s nepřímým vstřikováním vyšší. Motor je schopen pracovat při částečném zatížení s velmi chudou směsí a tím snížit spotřebu paliva řádově o 15% - 20%. Díky přímému vstřiku lze do procesu spalování zasahovat zejména dávkou paliva, což u nepřímého vstřikování nebylo možné v důsledku uzavření spalovacího prostoru ventily. [9]

V zážehovém motoru je přípravná fáze méně komplikovaná v důsledku odpaření velké části paliva před zažehnutím, homogenita směsi je poměrně dokonalá už v okamžiku zažehnutí a vysokou těkavostí benzinu. Tyto motory nutně vyžadují pro svůj chod zapalovací svíčku. Vzduch je určitým způsobem smíchán s palivem a pomocí komprese pístu se takto vzniklá směs stlačí. Elektrická jikra zapálí jen malý objem směsi a tím se vytvoří ohnisko zážehu. Od tohoto místa je do směsi předávána energie a hoření se postupně šíří do dalšího objemu směsi. Rychlost hoření lze zvýšit turbulentním prouděním vzduchu, tj. vetší rychlost vzduchu při vstupu do válce, tvarem sacího kanálu a tvarem dna pístu.
V turbulentním prostředí, při heterogenním spalování, vznikají v důsledku turbulentní difuze hořících proudů do nespálené směsi druhotná ohniska zážehu. Rychlost hoření v tomto případě se může zvýšit až na 20-70 m/s. Proces spalování směsi pak probíhá přibližně 35-75° otočení klikového hřídele. Tento způsob spalování se považuje za normální, ale mohou nastat případy, kdy za určitých podmínek může dojít k časově neřízenému zážehu i ve více místech nebo ke vznícení. Při vznícení dochází k okamžitému shoření zbylého objemu směsi. Vzniká tím uvolnění velkého množství energie, které vyvolá rozkmitání a tlakový ráz na celý klikový mechanizmus. Velký tlak na první pístní kroužek a tlaková vlna způsobí slyšitelné klepání. Konstrukce vstřikování paliva a přesná regulace řídící jednotkou je jednou z mnoha částí, jenž napomáhá předejít k tomuto nežádoucímu spalování. [1]

2.1 ČINNOST VSTŘIKOVACÍ SOUSTAVY A KONSTRUKCE

Pro správný chod musí být v okolí zapalovací svíčky směs takového složení, která je ještě schopna zážehu. To znamená vhodně konstruovat umístění vstřikovače, zapalovací svíčky, sacích kanálů a případně tvar dna pístu. Následně vstřikovací soustavu pro nové podmínky spalování. Ta musí dokázat vyvinout tlak paliva minimálně 50 barů a umožnit přípravu dávky přesně a rychle.

Obr. 2 Konstrukce spalovacího prostoru přímého vstřikování benzinu [10]

Poměr mezi obsahem vzduchu a paliva udává součinitel přebytku vzduchu lambda. Poměr mezi přiváděným vzduchem a palivem, kdy číslo lze porovnávat se číslem stechiometrického poměru.

$$\lambda = \frac{mno\check{z}stv\acute{i}\ vzduc\ hu}{mno\check{z}stv\acute{i}\ paliva\ *stec\,hiometr\ ick\acute{y}\ sou\check{c}initel} \tag{3.1.1}$$

Stechiometrický součinitel udává hodnotu vzduchu v kg ke spálení 1kg paliva. Pro zážehový motor se nejčastěji uvádí 14,7.

Pro $\lambda < 1$ = Směs je označovaná jako bohatá, díky přebytku paliva nebo sníženém obsahu vzduchu.
Pro $\lambda > 1$ = Směs je chudá, vzniká při přebytku vzduchu nebo snížením obsahu paliva.
Pro $\lambda > 1$ = Vzduch je stejný jako teoreticky potřebný obsah vzduchu ke spálení všeho vstřikovaného paliva. [9]

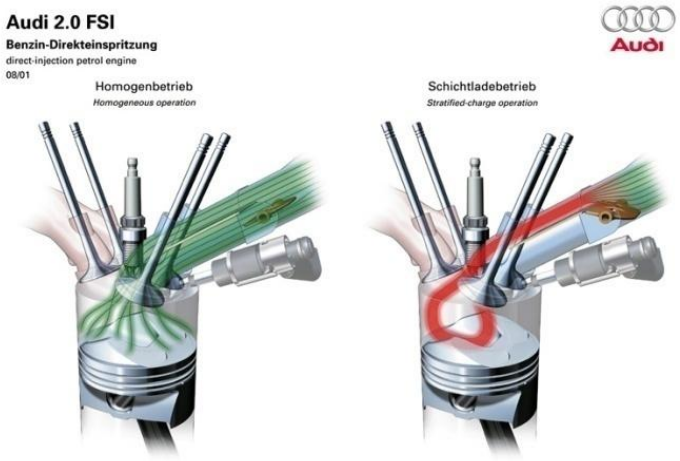
Odlišnost oproti nepřímému vstřikování nalezneme zejména v rozdílu sacího kanálu a dna pístu. Kanál může být umístněn svisle (případ GDI) nebo tvarem a možnou zástavbou vířivých klapek. Tvarem dna pístu lze také měnit proud vzduchu ve válci.

Při provozu se určují zejména dva způsoby zátěže motoru:

a) Částečné zatížení, při kterém regulace dávky paliva probíhá kvalitativně tzv. změnou složení zápalné směsi. Nasávaný vzduch je veden obtokem okolo škrticí klapky k zmenšení energetickým ztrátám. Změnou proudění vzduchu a správnému okamžiku vstřiku se umožní spalování velmi chudé směsi. K zapalovací svíčce se dostane směs schopná zážehu a zbytek směsi ve válci vrstevně prohořívá.
   Motor při tomto spalování pracuje s velmi chudou směsí až 40:1 a nízkým požadavkem na výkon.

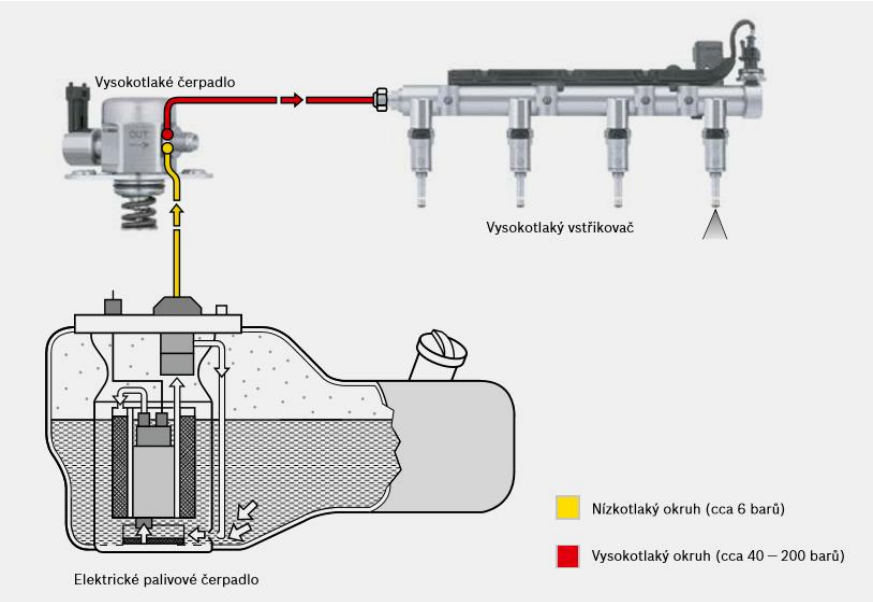
b) Plné zatížení, v případě nástupu vysokých otáček nebo požadavku vysokého výkonu. Nasávaný vzduch proudí skrz škrticí klapku, která je v pozici okolo nejvyššího otevření. Palivo je vstřikováno do válce v průběhu sacího zdvihu pístu, kdy vzduch je bez vnitřního proudění. Vytvoří se paprsek ve tvaru kužele ideální pro vytvoření homogenní směsi a účinné odpařování. Tímto způsobem se snižuje teplota ve válci a zvyšuje účinnost motoru.

Při akceleraci z částečného zatížení přepne řídicí jednotka motoru na dvoufázové vstřikování paliva. Při sání se vstříkne malé množství a těsně před zážehem dojde ke vstříknutí hlavní dávky. Tím se snižuje schopnost detonačního spalování, které se objevuje nejčastěji právě při zrychlení z nízkých otáček. Pro změnu proudění vzduchu u modernějších motorů se využívají vířivé klapky. Při střední zátěži mají tedy za úkol vytvořit ve válci intenzivní vír. Při zavření vzduch proudí jen horní částí sacího kanálu generující intenzivní proudění ve válci tzv. Tumble. Pro plný výkon se klapka otevře a vzduch proudí skrze celý průřez sacího kanálu. Tím se směs připraví k homogennímu spalování. [9]



Obr. 3 Spalování při vysoké zátěži (vlevo) a při částečném zatížení (vpravo) [11]

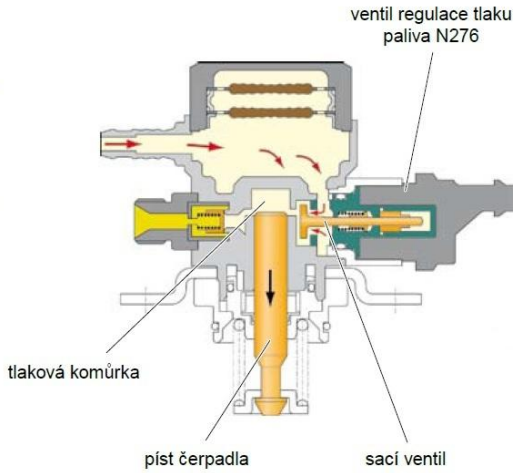
Z principu stlačení vzduchu kompresním zdvihem pístu je nutné, aby vstřikované palivo překonalo tlak ve válci. Požadovaný tlak se dosahuje pomocí vysokotlakého vstřikovacího čerpadla společně se zásobníkem tlaku a vysokotlakými vstřikovacími ventily.
Způsob dopravy paliva je zprostředkován elektrickým čerpadel v nádrži. Z čerpadla palivo protéká palivovým čističem do vysokotlakého vstřikovacího čerpadla. Odtud je tlak v systému vyšší jak 50 barů a proudí ke vstřikovačům dle obr. 4.



Obr. 4 Palivový okruh systému přímého vstřikování [12]

Části vysokotlakého vstřikování zážehového motoru:

1. Čerpadlo - stlačení paliva probíhá pístem, který je prostřednictvím vačkového hřídele ovládající ventily posouván.



Obr. 5 Řez vysokotlakým vstřikovacím čerpadlem motoru 1.2 TSI modelu Seat Toledo [13]

Obr. 6 Vysokotlaké vstřikovací čerpadlo firmy APR pro motory Audi 2.5 TFSI [15]

2. Palivová lišta - zásobník, který uchovává palivo o určitém tlaku na všechny vstřikovače zároveň. Musí být dostatečně pružný pro tlumení tlakových pulsací, zároveň tuhý pro přizpůsobení tlaku paliva vlivem měnícím se potřebám motoru. Hodnota tlaku v zásobníku je kontrolována snímačem tlaku.

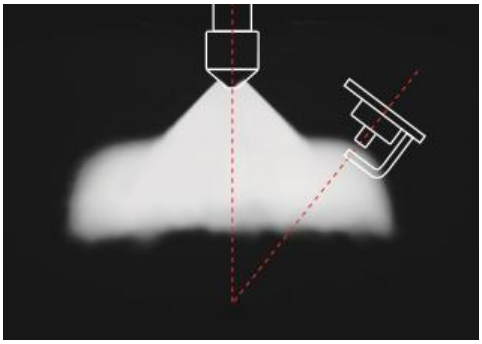
Obr. 7 Palivová lišta pro přímé vstřikování benzinu od firmy Bosch [16]

3. Vstřikovače - zařízení, které posuvem jehly a následném vstřiku má za úkol rozprášit co nejjemněji palivo. Dle konstrukce se mohou lišit jednotlivé vstřikovače v počtu otvorů na trysce a ovládání jehly.

Piezoelektrické vstřikovače

Otevírání jehly trysky se ovládá piezoelektrickým elementem. Na něj je přiváděno elektrické napětí a element se na základně velikosti tohoto napětí deformuje.

Obr. 8 Piezoelektrický vstřikovač HDEV4 firmy Bosch [14]

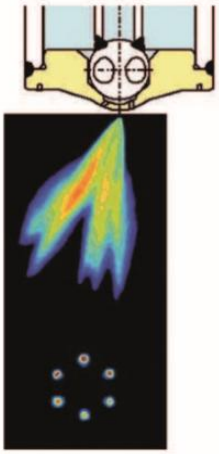


Obr. 9 Tvar paprsku vstřiknutého paliva vstřikovačem HDEV4 [14]

Vstřikovače ovládané solenoidem

Solenoid je zavedený výraz pro cívku, která uvnitř vytváří magnetické pole. Zdrojem je elektrická energie a pomocí tohoto pole vytváří translační pohyb jehly vstřikovače. Hlavní výhodou tohoto je variabilita vůči úhlu vstřiknutí, tvaru vstřikovaného množství a velikosti průtoku paliva. [17]

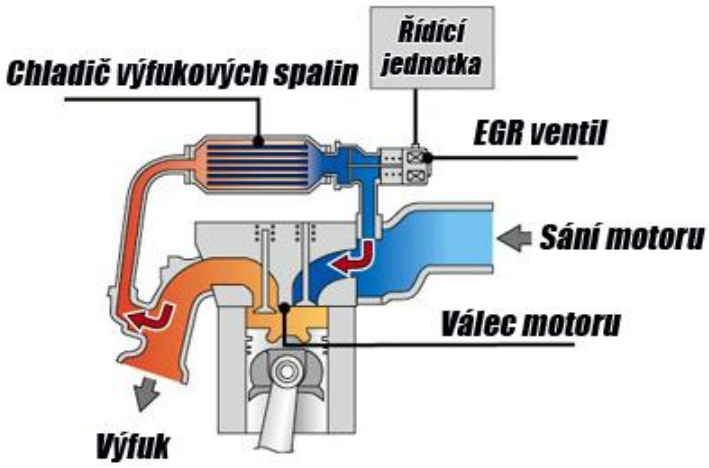
Obr. 10 Vstřikovač HDEV5.2 firmy Bosch [18]



Obr. 11 Paprsek vstřikovaného paliva [18]

2.2 ZPŮSOBY REDUKCE EMISÍ ZÁŽEHOVÝCH MOTORŮ S PŘÍMÝM VSTŘIKEM

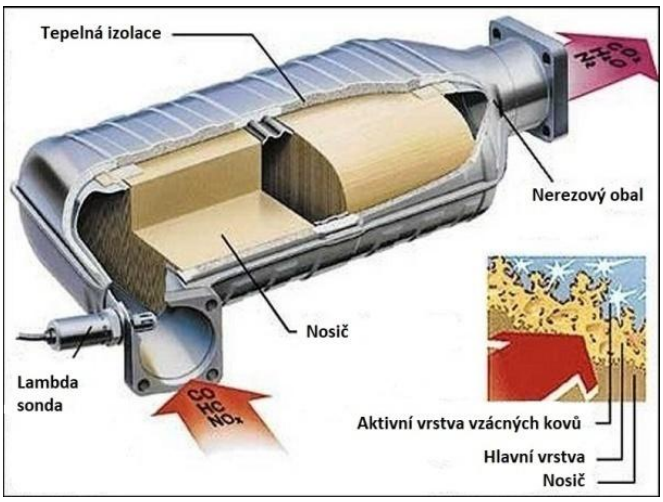
Pracovní proces probíhá většinou v režimu vrstveného spalování chudé směsi. Klasická koncepce lambda regulace v kombinaci s trojčinným katalytickým konvertorem nestačí na zvýšený výskyt oxidů dusíku ve výfukových plynech. Pro aktivní regulaci množství NO_x se využívá technologie účinného zpětného vedení výfukových plynů. Funkci provádí EGR ventil (Exhaust Gas Recirculation). Část spalin se vede potrubím zpět do sání. Při provozu motoru za studena pomáhá tento systém rychleji ohřát motor na ideální provozní teplotu. Po dosáhnutí provozní teploty naopak směs ve válci ochlazuje a tím snižuje obsah NO_x. Dosahuje se tím snížení obsahu oxidů dusíku až o 70% v závislosti na konstrukci motoru. [9]



Obr. 12 Systém recirkulace výfukových plynů [19]

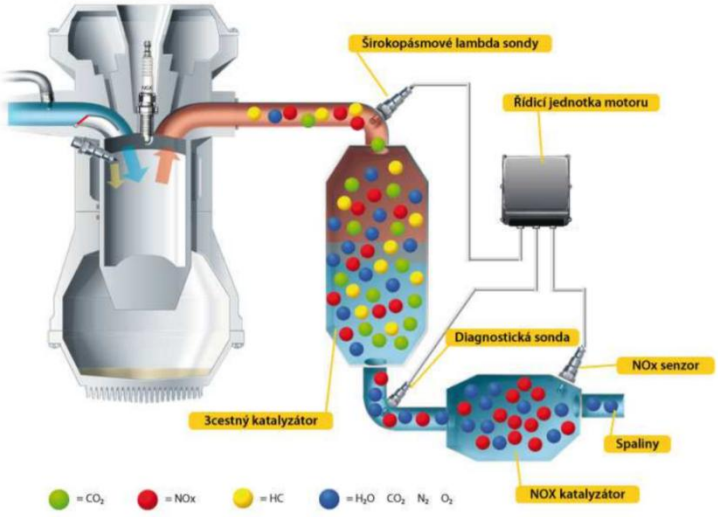
Pro splnění zpřísňujících se emisních limitů tento systém samostatně nestačí. Současně se tedy využívá třícestný řízení nebo zásobníkový katalytický konvertor.

Oxidačně - redukční (třícestný) odstraňuje tři hlavní škodlivé chemické sloučeniny (CO, HC a NO_x), při vysoké účinnosti až 95%. Základem je keramický nebo kovový nosič nesoucí základní nosnou vrstvu. Zde je nanesena vlastní aktivní vrstva platiny a dalších prvků podle druhu konvertoru. Obsahem je platina a paladium pro oxidační katalyzátory, jež urychlují oxidaci oxidů uhelnatého a uhlovodíků. Obsahem je navíc rhodium, které urychluje redukci oxidů dusíku. Výfukové plyny prochází konvertorem, kde na povrchu chemicky reagují s vzácnými kovy. Hlavním faktorem vysoké účinnosti je lambda regulace, která snímá obsah zbytkového kyslíku ve výfukových plynech. Ta je napojená na řídící jednotku motoru a počítá se jako jedna z mnoha informací pro dávku paliva. Díky této regulaci se označuje konvertor jako řízený, bez lambda regulace klesá účinnost zařízení asi na 50%.
Velkým problémem nastávají případy poruch motoru, kdy může do spalovacího prostoru proniknout motorový olej, který konvertor zanáší a zhoršuje jeho funkci. Funkce těchto konvertorů je závislá na teplotě. Pro požadované chemické reakce je nutností dosáhnout určitého pásma teplot. [9]



Obr. 13 Řez třícestným řízeným katalytickým konvertorem [20]

Při spalování chudé směsi se zvyšuje produkce NO_x. Další možností pro snížení vypouštěného NO_x do ovzduší je pomocí zásobníkového katalytického konvertoru. Principem funkce je vázání oxidů dusíku prostřednictvím absorpčního materiálu ve formě pevných dusičnanů. Při naplnění konvertoru se krátkodobě vstřikuje více paliva. Nespálené uhlovodíky společně s oxidem uhelnatým a ušlechtilými kovy v konvertoru slouží jako redukční prostředek a pevné dusičnany se rozloží zpět na NO_x. Takto uvolněné oxidy dusíku dále reagují s HC a CO podobně jako u třícestných konvertorů. Součástí tohoto konvertoru je snímač NO_x, kterým se měří hodnota zaplnění. Největším problémem je zanášení vrstev sírou. Ta zpomaluje a zhoršuje reakci chemických sloučenin. V případě zanesení takovým způsobem, že reakce neproběhne dle očekávání, řídicí jednotka spustí náhradní program. Ten spočívá ve vyšší dávce paliva a společně se zmenšeným úhlem předstihu zážehu způsobí zvýšení teploty v konvertoru na hodnotu okolo 650 °C. Při této teplotě začne síra reagovat a konvertor se vyčistí. [9]



Obr. 14 Umístění zásobníkového konvertoru a schéma obsahu výfukových plynů [6]

Důkladnější zkoumání emisí přímovstřikových zážehových motorů ukázalo, že podobně jako u vznětových motorů, vznikají pevné částice. Součástí takových moderních motorů se stal filtr pevných částic označovaný jako GPF (Gasoline Particulate Filter).
V případě zážehových motorů se jedná velikostně o 10 - 30 krát menší částice než u vznětových. Provoz probíhá přibližně v poměru stechiometrické směsi, kdy do filtru proudí výfukové plyny s nízkým obsahem kyslíku při teplotě přes 600°C. Kombinace vysoké teploty a velké koncentrace pevných částic ve filtru přispívá ke vzplanutí zprostředkované vyšším obsahem kyslíku především při deceleraci, kdy motorem prochází vzduch bez nebo s malou přítomností paliva. [21]

2.3 NEJČASTĚJŠÍ PORUCHY

Dlouhodobý provoz v nízké zátěži svědčí usazeninám uhlíku. Tyto úsady vznikají z odvětrávaní klikové skříně zpět do sání. Jedná se o výpary oleje a paliva, které mají schopnost se spékat na povrchu pístu, sání, ventilech, výfuku, vstřikovači a okruhu recirkulace spalin. Klesá efektivní průřez sání a motor ztrácí svůj výkon. Může docházet k záseku a nesprávné činnosti klapek v sání (Pokud je jimi motor vybaven). Při zvýšené vrstvě těchto karbonů na povrchu ventilů je možnost jejich nesprávného dosednutí do sedel. V takovém případě je na okraji ventil tepelně namáhán, co vede k podpálení a ztrátě tlaku ve válci. Při zvýšené produkci pevných částic dochází k usazeninám zhoršující chod EGR ventilu. V případě nesprávné funkce se na palubním přístroji objeví závada motoru zprostředkováním impulsu ze snímače tlaku.
Pokud nastane v motoru detonační hoření (klepání) je nutnost příčinu diagnostikovat a závadu odstranit, jinak může nastat poškození motoru.

Pro zamezení těchto jevů se doporučuje tankovat kvalitnější palivo s vyšším oktanovým číslem (minimálně dle pokynů výrobce) a pravidelně měnit motorový olej dle specifikace výrobce.

3 VZNĚTOVÝ MOTOR S PŘÍMÝM VSTŘIKOVÁNÍM

K tvorbě směsi dochází ve válci, kde je do nasátého, stlačeného a horkého vzduchu během kompresního zdvihu vstříknuto palivo. Takto smísená motorová nafta se vzduchem má mít schopnost samovolného vznícení bez zážehu z cizího zdroje. Než dojde k hoření, musí se palivo odpařit a vzniklé páry paliva promísit se vzduchem, což se stane difuzními procesy. Tímto způsobem dojde k vytvoření většího počtu ohnisek vznícení a poté teprve následuje hoření plamenem. Tento proces probíhá velmi rychle, rychleji než proces hoření v předmísené směsi (zážehový motor - homogenní proces spalování), protože je nastartováno současně z mnoha ohnisek rozložených v části nebo v celém objemu spalovacího prostoru včetně ohnisek vzniklých v průběhu pokračujícího vstřikování dávky paliva. Redukci těchto ohnisek lze ovlivnit urychlením přípravné fáze. Její průběh je rozdílný jako v případě zážehového motoru. Pro odpaření motorové nafty je potřebná vyšší teplota, proces probíhá déle, nedokonale a vytvořená směs je značně nehomogenní. Přípravnou fázi lze podpořit kvalitou rozptýlení vstřikovaného paliva, turbulencí stlačeného vzduchu a v neposlední řadě cetanovým číslem nafty (schopnost vznícení). Pro dosažení co nejlepšího rozprášení paliva je dnes přiváděno do motoru přes trysku vstřikovače palivo při tlaku až 200 MPa a více. [1]

V minulosti se využívala řadová vstřikovací čerpadla s pohonem od vačkového hřídele a mechanickou regulací dávky paliva. U větších prostředků (nákladní automobily, lokomotivy, lodní motory) se využívaly samostatné vstřikovací jednotky. Poháněné byly od vačkových hřídelí ventilového rozvodu. Dosahovaly tlaku až 150 MPa. Modernější byly rotační vstřikovací čerpadla s axiálním nebo radiálním pohybem pístu. Ty generovaly vysoký tlak (až 160 MPa) a následně rozdělovaly dávky paliva k jednotlivým vstřikovačům. Všechny tyto systémy šlo později kombinovat s elektronickou regulací množství dávky. Rozvojem elektroniky vznikly palivové soustavy PLD (Pumpe - Leitung - Duse) a PDE (Pumpe - Duse - Einheit). PLD je modulární vysokotlaký vstřikovací systém se samostatnými jednopístovými vstřikovacími čerpadly poháněné od vačkové hřídele ventilového rozvodu motoru. Od tohoto čerpadla je palivo při přetlaku až 160 MPa dopraveno přes potrubí ke vstřikovačům. U PDE tvoří vstřikovací čerpadlo a vstřikovací tryska jeden celek umístěný v hlavě válců. Umožňuje zvýšit tlak paliva až na 200 MPa. Pohon je řešen stejně jak u PLD pomocí vačkové hřídele ventilového rozvodu.
Modernější a nejrozšířenější systém je Common rail. Jedná se o tlakový zásobník, do kterého se přivádí palivo při přetlaku. Tento tlak se v palivové liště stále udržuje a je přímo napojen na trysky vstřikovače. Poté lze měnit dávku paliva otevřením jehly vstřikovače zprostředkované řídicí jednotkou. [9]

3.1 ČINNOST PŘÍMÉHO VSTŘIKOVÁNÍ COMMON RAIL A KONSTRUKCE

Vstřikovací tlak je vytvářen nezávisle na otáčkách motoru a vstřikovaném množství paliva. Palivo je připraveno pro vstřikování ve vysokotlakém zásobníku („Railu“). Pro všechny vstřikovače je tento zásobník společný („Common“). Trysky vstřikovačů jsou ovládané pomocí elektrohydraulických, elektromagnetických nebo elektrických ventilů. Doba jejich otevření a okamžik vstřiku je vypočítáván řídící jednotkou, která vyšle na tyto ventily příslušné signály.

Stejně tak jako u zážehového motoru je zde důležitý parametr součinitele lambda. Poměr mezi přiváděným vzduchem a palivem, kdy číslo lze porovnávat s číslem stechiometrického poměru.

$$\lambda = \frac{mno\check{z}stv\acute{i}\ vzduc\ hu}{mno\check{z}stv\acute{i}\ paliva\ \ *stec\ hiometrick\ \acute{y}\ sou\check{c}initel} \tag{4.1.1}$$

Stechiometrický součinitel udává hodnotu vzduchu v kg ke spálení 1kg paliva. Pro vznětový motor se nejčastěji uvádí 14,5.

Pro $\lambda < 1$ = Směs je označovaná jako bohatá, díky přebytku paliva nebo sníženém obsahu vzduchu.
Pro $\lambda > 1$ = Směs je chudá, vzniká při přebytku vzduchu nebo snížením obsahu paliva.
Pro $\lambda > 1$ = Vzduch je stejný jako teoreticky potřebný obsah vzduchu ke spálení všeho vstřikovaného paliva. [9]

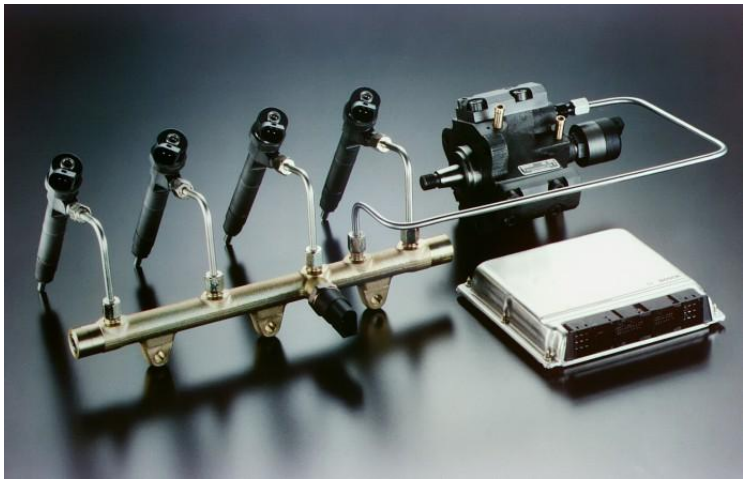
Systém common rail se dělí na jednotlivé generace zejména podle vstřikovaného tlaku:

1. Generace (od 1997) - Vstřikovací tlak až 135 MPa umožňující předstřik. Hlavním úkolem je předehřát spalovací prostor pro snazší vznícení nafty při hlavním vstřiku.

2. Generace (od 2001) - Vstřikovací tlak až 160 MPa společně s možností dalšího vstřiku tzv. „dostřik“, který se realizuje při expanzi a pomáhá zvyšovat teplotu výfukových plynů, tím i katalytického konvertu.

3. Generace (od 2003) - Vstřikovací tlak až 200 MPa. K možnosti ovládání jehly vstřikovače solenoidy přibylo ovládání piezoelektrickými elementy, které jsou přesnější, rychlejší a umožňující více vstříknutí.

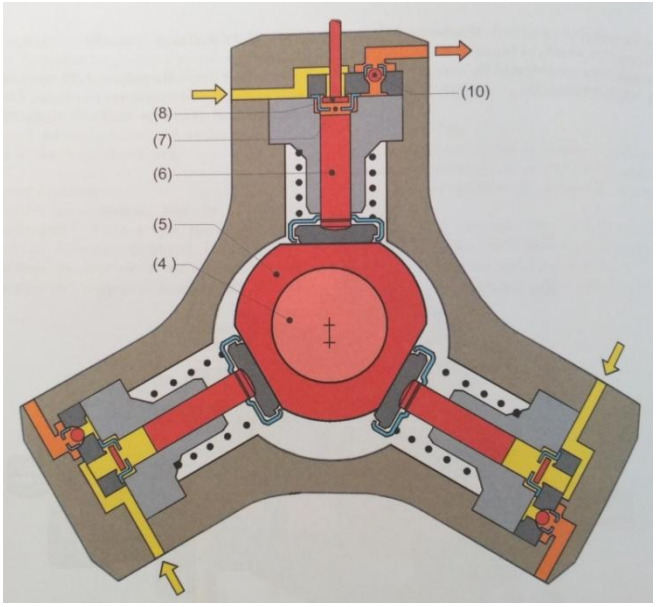
4. Generace (od 2008) - Vstřikovací tlak až 250 MPa. Ovládání jehly je běžně piezoelektrickými elementy nebo magnety. Dalším vylepšením je vstřikování paliva o rostoucím tlaku, které umožňuje redukci tlakových špiček v systému a snížení oxidů dusíku. [9][5][22]



Obr. 15 Soustava vysokotlakého okruhu vstřikování systému Common rail [23]

Části vysokotlakého vstřikování vznětového motoru:

1. Čerpadlo - Úkolem je dodávat dostatečné množství paliva pod vysokým tlakem při všech režimech motoru. Čerpadlo je poháněno klikovým hřídelem motoru prostřednictvím ozubeného soukolí, ozubeného řemenu nebo řetězu. Převodový poměr je nastaven tak, aby při maximálních otáčkách motoru nepřesáhly otáčky řemenice čerpadla 3000 min^{-1}. [9]



Obr. 16 Vysokotlaké palivové čerpadlo (příčný řez) [8]

(4) - hnací hřídel čerpadla
(5) - výstředníková vačka
(6) - píst jednotky čerpadla
(7) - prostor ve válci jednotky čerpadla
(8) - sací ventil
(10) - výtlačný ventil

2. Zásobník - Má stejné vlastnosti jak u zážehového motoru s přímým vstřikem. Rozdíl je zejména konstrukčně, kdy v zásobníku systému common rail je téměř desetinásobek tlaku paliva.

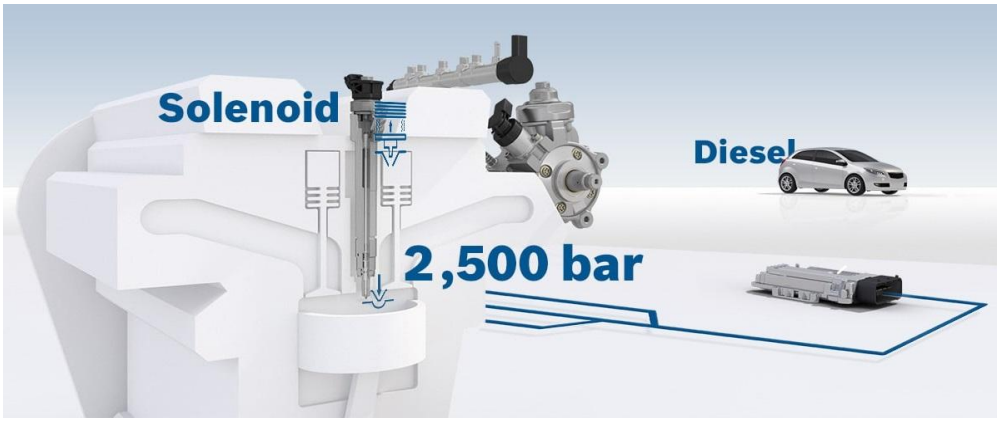
Obr. 17 Vysokotlaký zásobník paliva (rail) [12]

3. Snímač tlaku - Poskytuje údaje o tlaku v zásobníku pro řídicí jednotku. Uvnitř snímače je membrána, která stlačením mění elektrický odpor elementu na ní umístěné. Tím se mění předávané napětí.

4. Pojistný ventil - Při vyšším tlaku paliva v zásobníku se uvolní odtok nafty zpět do nádrže. Může být umístěn i u výstupu vysokotlakého okruhu čerpadla.

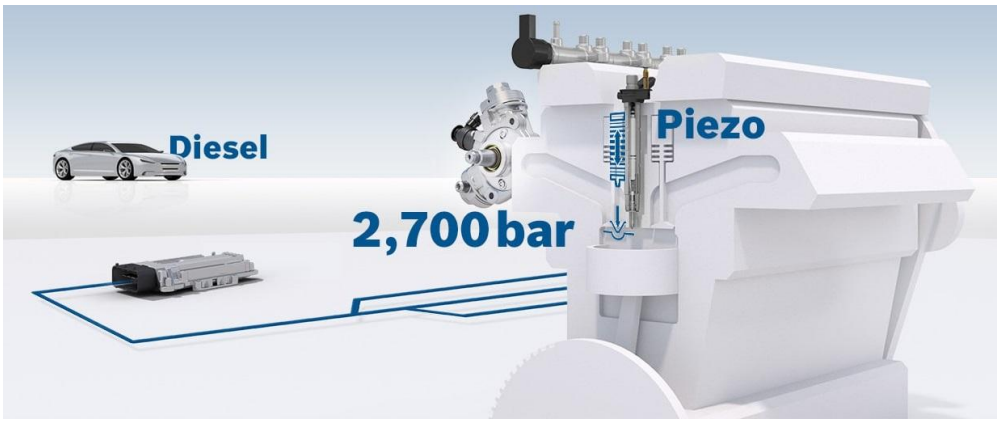
5. Vstřikovač - Musí palivo vstřiknout v přesně určeném momentu o určité délce a množství. Všechny vstřikovače jsou ovládány elektricky. Nejpoužívanější vstřikovače jsou schopny rozfázovat vstřik až na 7 samostatných vstřiknutí. Tím lze dosáhnout nižšího namáhání mechanických částí motoru, jeho tvrdosti chodu a emisí ve výfukových plynech. [9]

Elektromagnetický vstřikovač
Pohyb jehly je zprostředkován cívkou vytvářející magnetické pole zvané solenoid. Na základě elektrického napětí z řídicí jednotky motoru se toto pole reguluje. Vstřikovač je schopný palivo vstřikovat při 1 600 až 2 500 barů při osmi samostatných vstřiknutích na jednu dávku. [25]



Obr. 18 Elektromagnetický vstřikovač firmy BOSCH, jehla ovládaná solenoidem [25]

Piezoelektrický vstřikovač
O pohyb jehly se stará piezo element, který se na základě velikosti elektrického napětí z řídicí jednotky motoru smršťuje nebo roztahuje. Aktivační doba vstřiku je cca 0,1 ms. Palivo se vstřikuje při tlaku 2 000 až 2 700 barů v možných desíti vstřiknutích za jednu dávku. Výsledkem je preciznější dávkování a lepší rozprášení paliva. [26]



Obr. 19 Piezoelektrický vstřikovač firmy Bosch, jehla ovládaná piezo elementem [26]

6. Pojistné prvky - Tlakový pojistný ventil omezuje tlak paliva ve vysokotlakém zásobníku tím, že při příliš vysokém tlaku uvolní odtok paliva zpět do nádrže.
   Omezovač průtoku zabraňuje nepravděpodobnému případu trvalého vstřikování jednoho vstřikovače. Při překročení maximálního odebíraného množství paliva uzavírá přívod ze zásobníku ke vstřikovači, kterého se tento problém týká. [9]

7. EDC - Systém pro vznětové motory umožňující přesnější regulaci, ovládání a přizpůsobení systému vůči provozním podmínkám motoru prostřednictvím elektroniky.

Elektronické řízení (Electronic Diesel Control)
V současné době zahrnuje toto řízení komplexní elektronický systém vozidla schopný zpracovávat velké množství dat v reálném čase. Mimo řízení elektronických součástí motoru dále zpracovává prvky komfortu (například tempomat) a částečně kompletní elektronický systém pohybu vozidla.
Z pohledu vstřikování lze řídit a využívat:

- vícenásobného vstřikování za jednotku cyklu
- adaptace množství paliva na tlaku v sání
- řízení recirkulace spalin
- teplotu v závislosti na přebytku vzduchu ve směsi
- začátek vstřiku a množství dávky paliva, při jejich vysoké přesnosti během celé životnosti systému, včetně výkonových parametrů vstřikování.
- podpora systému zpracovávaní emisí

EDC komunikuje i s ostatními elektronickými systémy, například systém trakce (TCS), elektronické řízení převodovky (ETC) nebo elektronický systém stability (ESP). Výsledkem je možnost integrace řízení motoru do celého systému řízení vozidla. Tímto způsobem lze provádět funkce jako redukce točivého momentu motoru v případě změny převodového stupně v automatické převodovce nebo proti prokluzu kol a podobně.
Tento systém je rozdělen do tří bloků:

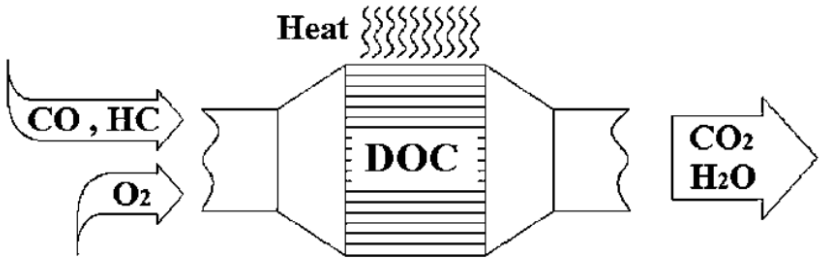
- Senzory a setpoint snímače
  detekují provozní podmínky (otáčky motoru,…) a dvojí hodnotu (pozice spínače,…). Mění fyzikální proměnné na elektrický signál.
- ECU (Electronic Control Unit)
  zpracovává informace ze senzorů a snímačů včetně následných matematických procesů. Ovládá akční členy výstupními elektrickými signály. Působí jako rozhraní mezi dalšími systémy včetně diagnostiky vozidla.
- Akční členi
  mění výstupní elektrický signál z ECU na ovládání mechanického pohybu (zdvih jehly vstřikovače solenoidem,…).

Pomocí toho umožňují vznětové motory vysokou úroveň pohodlí, komfortu za sníženého množství produkovaných emisí a hluku. [27]

V automobilech lze najít vstřikovače a části systému common rail od nejrůznějších firem jako například Bosch, Delphi, VDO Siemens (Continental AG) nebo Denso.
Komponenty se mohou lišit svými vnějšími rozměry, velikosti tlaku vstřikovaného paliva nebo ovládáním jehly, atp…

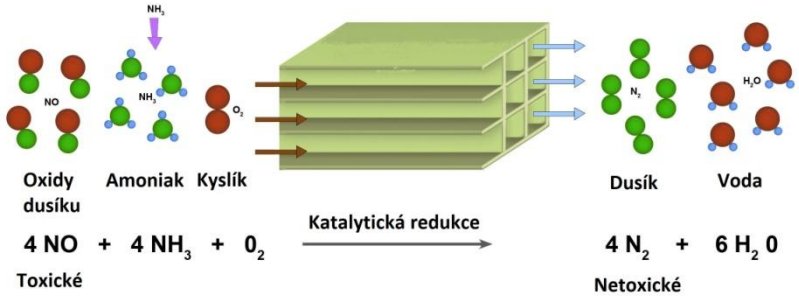
3.2 ZPŮSOBY REDUKCE EMISÍ VZNĚTOVÝCH MOTORŮ S PŘÍMÝM VSTŘIKEM

Oxidační katalytické konvertory snižují obsah HC a CO. Tyto chemické sloučeniny se vyskytují ve výfukových plynech v okamžiku, kdy se ve válci objeví větší objemy kapiček paliva, které celé neprohoří. Tím vzniká bohatší směs a emise s tím spjaté. Podobně jako u katalytického konvertoru u zážehového motoru využívá aktivní vrstvu s obsahem vzácných kovů, které na povrchu oxidují s toxickými látkami. V případě konstrukce motoru s tímto konvertorem je umístěn jako první součást ovlivňující emise motoru ve výfukovém potrubí.



Obr. 20 Oxidační katalytický konvertor pro vznětové motory [28]

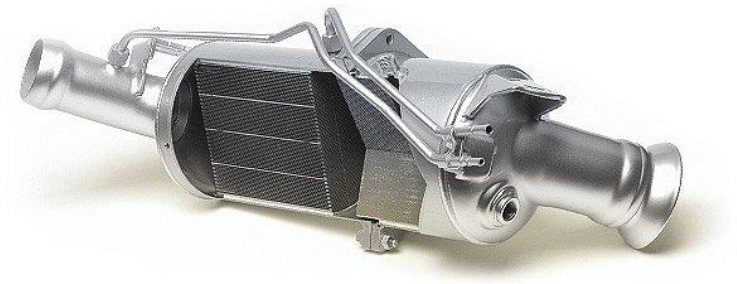
Selektivní katalytický konvertor DeNO$_x$ se řadí do kategorie konvertorů typu SCR (Selektivní katalytické redukce). Je to způsob jak redukovat NO$_x$ na vodík a dusík. V aktivní vrstvě se oproti třícestnému reduktoru navíc vyskytuje iridium. To má schopnost pracovat s vyšší účinností než rhodium. Redukční reakce jsou podporovány nespálenými složkami. Ty vznikají uměle vytvořeným nedokonalým spalováním, jako je zmenšení úhlu předstihu nebo dodatečným vstřikem paliva. Modernější způsob redukce NO$_x$ je ve formě Adblue. Je to směs o složení 32,5% močoviny a 67,5% vody. Pomocí vstřikovače řízeným řídicí jednotkou vstřikuje tuto kapalinu do výfukového potrubí před katalytický konvertor typu SCR. Pro svůj chod musí dosahovat konvertor okolo 200 °C. Adblue je vstřikováno neustále v případě, že konvertor je zahřát na svojí provozní teplotu a objem spalin neklesl pod určité minimum (běh motoru naprázdno). Adblue je před vstřikováním zahřáté společně s přetlakem okolo 5 barů. Kapalina se musí ve výfukových plynech odpařit a pomocí lopatek smíchat. Množství takto připravené směsi určuje výslednou účinnost SCR konvertoru. [30]



Obr. 21 Schéma procesu selektivní katalytické redukce za příměsi Adblue [29]

Zásobníkové konvertory mají schopnost snižovat produkci NO_x absorpcí prostřednictvím absorpčního materiálu ve formě pevných dusičnanů. Ty vážou na sebe oxidy dusíku a při nasycení probíhá regenerace filtru redukcí z oxidu uhelnatého, nespálených uhlovodíků a ušlechtilých kovů. Absorpce probíhá při vrstveném spalování, tedy nízké zátěži. Pro regeneraci je nutnost bohatost směsi zvýšit, přepnout na režim homogenního spalování. Následkem oproti SCR konvertorům je zvýšená spotřeba paliva řádově v jednotkách procent. Velkou výhodou je téměř dvojnásobná účinnost a absence jakýchkoliv dalších zařízení ve formě kapaliny, apod. Ovšem při zvýšené citlivosti na síru a složitějším řízením motoru při zvýšením dávky paliva. [9]

Již z názvu vyplívá, že pro zachycování pevných částic slouží filtr pevných částic. Tyto částice jsou větší než v případě zážehového motoru. Toto lze pozorovat i okem, kdy vozidla se zaslepeným, neaktivním, či vymontovaným filtrem viditelně vypouští dým sazí zejména při prudké akceleraci. Filtr tvoří kovový obal s vnitřním keramickým tělesem. Těleso má pórovitou strukturu tvořenou z karbidu křemíku. Výfukové plyny procházející skrze pórovitou keramickou stěnu, kde se zachytávají pevné částice. Při určitém procentu zaplnění filtru probíhá jeho regenerace. V závislosti na konstrukci buďto dostřikem (pozdní dávka paliva, která způsobí ve filtru spálení sazí) nebo přídavným vstřikovačem ve výfukovém potrubí před filtrem. [31]



Obr. 22 Řez filtrem pevných částic pro vznětové motory [32]

3.3 NEJČASTĚJŠÍ PORUCHY

Vzhledem k vysokým tlakům, složitostí a požadavkům na přesnost opracování částí vysokotlakého okruhu jsou tyto systémy velmi citlivé na veškerou kontaminaci paliva. Zejména na mechanické nečistoty, vodu a rozpuštěné soli s korozivním účinkem.

4 ŠKODA TSI EA211

Generace motorů EA211 přišla na trh u konce roku 2012 zahrnující tří- a čtyřválcové motory s hliníkovým blokem, které se s modernizacemi vyrábí dodnes.

tříválcové: 1.0 MPI o výkonu 44 kW, 55 kW a 59 kW
1.0 TSI s výkonem 70 kW, 81 kW a 85 kW

čtyřválcové: 1.6 MPI o výkonu 81 kW
1.4 TSI s výkonem 94 kW nebo 110 kW

Motory se vyrábí v hlavním výrobním závodě Škody v Mladé Boleslavi. Tyto pohonné jednotky se montují do vozidel značky Volkswagen, Škoda a Seat. K datu 24. 5. 2019 Škoda vyrobila již 2 500 000 těchto motorů. [33]

Obr. 23 Pohled na motor 1.0 TSI o výkonu 85 kW z modelu Škoda Octavia 3 [34]

Vysokotlaké vstřikovaní je součástí všech pohonných jednotek EA211 TSI. V první generaci se systémový tlak paliva pohyboval okolo 250 baru. Vývojem se vhodně optimalizoval paprsek vstřikovaného benzinu včetně proudění vzduchu ve válci. Výsledkem je nižší spotřeba, emise a kontaminace oleje benzinem. Soustava umožňuje až tři vstřiky za cyklus při startu motoru, zahřívání katalytického konvertoru a plného zatížení až do 3 000 otáček za minutu. Motory spojené s filtrem pevných částic od září 2018 mají ve vysokotlaké větvi vstřikování tlak paliva okolo 350 barů. [35]

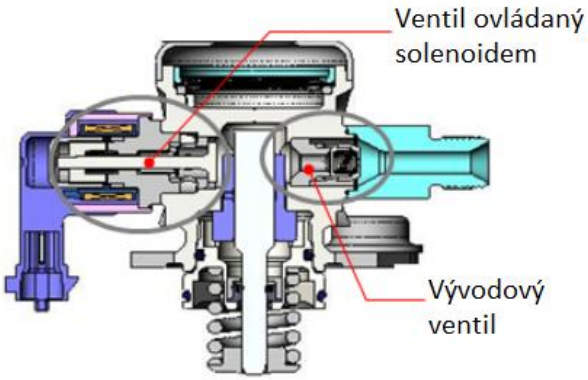
Předchůdce motorů pod označením EA211 byla generace EA111. Vylepšení z hlediska vstřikování bylo zvýšení systémového tlaku paliva pro lepší odpařování, následné smíchání benzinu se vzduchem při produkci menšího počtu emisí výfukových plynů a pevných částic. [36]

4.1 ČÁSTI SYSTÉMU VSTŘIKOVÁNÍ

1. Vysokotlaké čerpadlo

Nejčastěji aplikované jsou od firem Hitachi, Meat&Doria nebo Pierburg v závislosti na trhu, kde jsou vozidla s těmito motory prodávané.

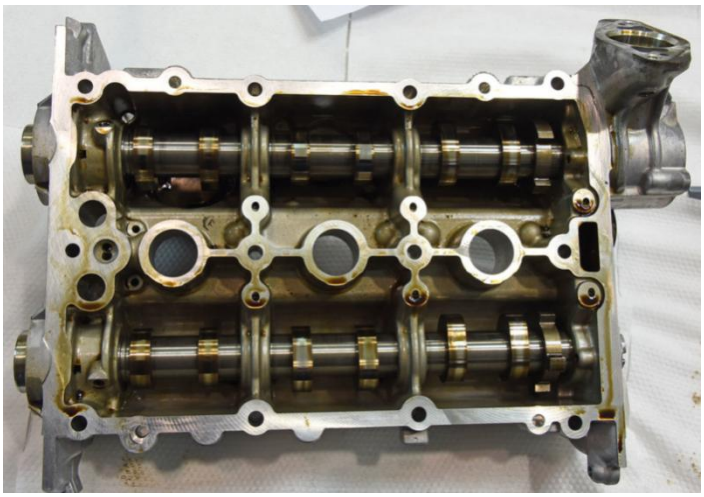
Obr. 25 Umístění a zdroj pohybu pístku vysokotlakého čerpadla u motoru TSI EA888 [37]



Obr. 24 Řez vysokotlakého palivového čerpadla firmy Hitachi [38]

Obrázek č. 31 je z motoru generace motorů EA888, nicméně konstrukční řešení pro pohyb pístku čerpadla je řešen stejně i u generace EA211.
Z nízkotlaké větve je palivo přiváděno do prostoru nad pístem skrze ventil ovládaný solenoidem. Tento ventil má za úkol ovládat množství stlačeného paliva v závislosti na zatížení motoru. Pohyb pístu čerpadla je zajištěn otáčivým pohybem vačkového hřídele motoru prostřednictvím válečku. Vstupem vysokotlakého okruhu je vývodový ventil. Ten musí uzavřít okruh v případě vypnutí motoru. Píst svým pohybem palivo stlačí na hodnotu tlaku okolo 350 barů. Nad komorou stlačení paliva se nachází prvek pro tlumení pulzací.

Pro bezproblémový chod čerpadla je nutností mazání, které díky umístění pohonu čerpadla je řešeno motorovým olejem. Benzin nemá mazací vlastnosti jako nafta, proto je toto řešení mazání nejefektivnější. Takto poháněné čerpadlo se využívá ve většině zážehových motorů s přímým vstřikováním. Pohon řemenem od řemenice motoru by byl složitý právě z důvodu mazání, úbytku výkonu motoru a s tím spojená složitost a velikost rozvodového mechanismu.



Obr. 26 Pohled na víko hlavy válců s řešením pro úchyt čerpadla (pravý roh víka) [39]

2. Zásobník tlaku paliva a snímače

Obr. 27 Pohled na zásobník tlaku paliva včetně snímače tlaku pro 1.0 TSI 85 kW [40]

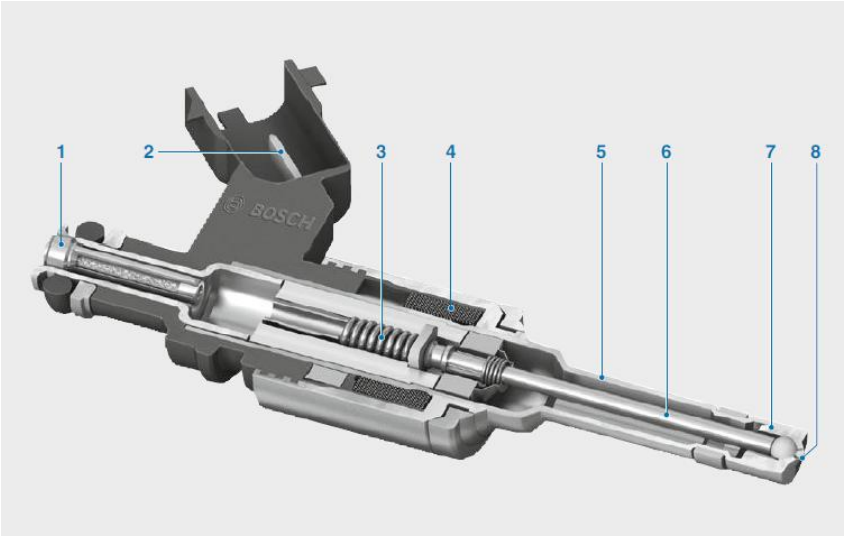
Základ tvoří trubice s otvory pro přívod paliva ke vstřikovačům. Na obrázku č. 27 lze vidět snímač tlaku paliva umístěný na levém boku zásobníku. Tlak paliva je přiváděn na membránu, ta deformuje piezoelektrický element. Deformací element vyvolá jistý napěťový signál a ten je poslán do řídicí jednotky motoru. Naměřený tlak je použit jako aktuální hodnota pro regulaci tlaku v rozvodu. Nadbytečné množství paliva proudí zpět do palivové nádrže přes regulátor tlaku. [42]

Tento typ senzorů je odolný proti vibracím a má velice kompaktní a robustní konstrukci, díky které je schopen přesného měření během celé své životnosti.
Některé další snímače jsou schopny měřit teplotu paliva v zásobníku pomocí NTC termistoru. Teplota paliva je v tom případě další veličinou, na základě které řídicí jednotka vyhodnotí délku a načasování vstřiku paliva do válce. [41][12]

3. Vstřikovače

Pro motory TSI z řady EA211 se výhradně využívají vstřikovače značky Bosch. Typ HDEV 5 je solenoidový vstřikovač, který se využívá hlavně z důvodu nižší pořizovací ceny než v případě piezoelektrického vstřikovače HDEV 4.

Obr. 28 Vstřikovač požitý na motoru 1.0 TSI 85 kW [43]



Obr. 29 Řez vstřikovačem HDEV 5 [44]

(1) - přívod paliva s filtrem
(2) - elektrické připojení
(3) - pružina
(4) - cívka
(5) - pouzdro jehly
(6) - jehla s magnetickou kotvou
(7) - sedlo ventilu
(8) - vstřikovací otvor

Vstupem napětí na cívku (4) se generuje magnetické pole. Kotva jehly (6) je vtahována proti pružině (3) a vstřikovacím otvorem (8) protéká palivo do spalovacího prostoru. Množství vstřikovaného paliva je závislá na jeho tlaku a době otevření ventilu. Po vypnutí napájení je jehla pružinou tlačena zpět do sedla ventilu. Zastaví se tím dodávka paliva do válce. Rozprášení paliva a tvar jeho paprsku závisí na geometrii otvorů v sedle ventilu. Vstřikovače pro motory 1.0 TSI mají 5 otvorů. [44]

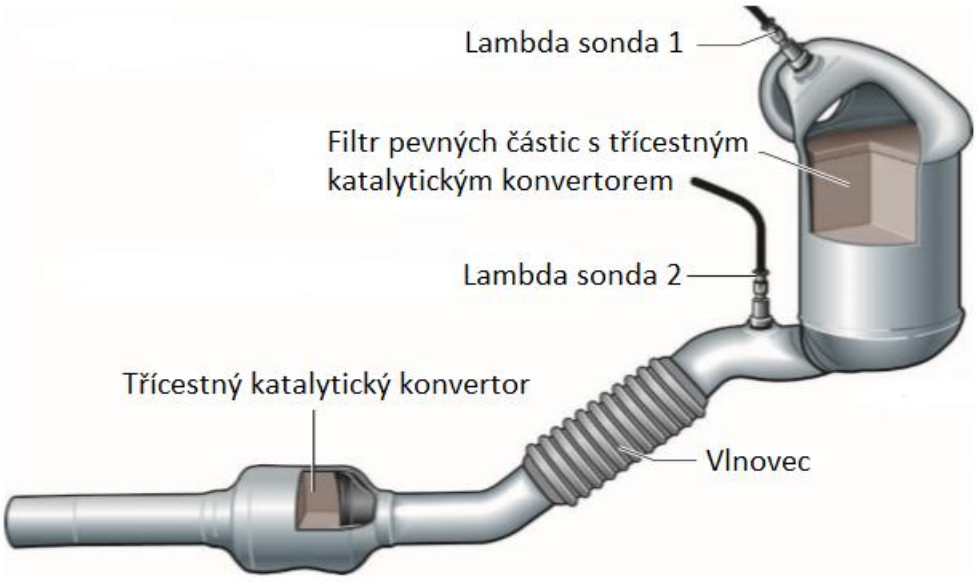
4.2 EMISNÍ LIMITY A ZPŮSOBY JEJICH PLNĚNÍ

1. září 2018 přišla norma EURO 6d-TEMP. Od 1. září 2019 nově s rozšířenou metodikou měření emisí RDE (Real Driving Emissions). Od tohoto data jsou nově registrovaná vozidla podrobena měřícím cyklem jak WLTP (Worldwide Harmonized Light - Duty Vehicles Test Procedure), tak i RDE.
RDE znamená měření škodlivých látek ve výfukových plynech v reálném prostředí individuálně dle výbavy. Naopak WLTP probíhá v laboratoři na válcově zkušebně.
Při platnosti RDE musí nově registrovaná vozidla se zážehovým motorem splňovat hodnoty emisí:

- 60 mg/km NOx
- 1 000 mg/km CO
- koeficient shody pro NOx maximálně 2,1
- koeficient shody pro PM maximálně 1,5

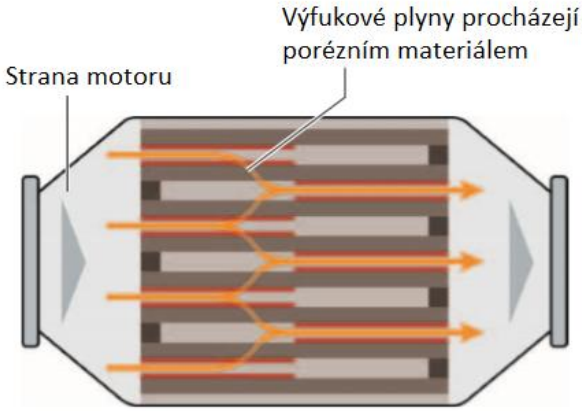
Koeficient shody udává maximální násobek naměřených emisí oxidu dusíku při metodice RDE vůči měřením v laboratoři WLTP. Od ledna roku 2020 platí koeficient shody pro NOx maximálně 1,5. [45]

Od zavedení normy EURO 6d-TEMP mají veškeré zážehové motory s přímým vstřikováním koncernu Volkswagen filtr pevných částic. Jeden ze způsobů jak zjistit jeho přítomnost je pomocí kódu motoru. Pokud kód začíná písmeny DK, tak motor filtr pevných částic má.



Obr. 30 Výfukový systém pro řadu motorů EA211 od roku 2018 [46]

Za turbodmychadlem je umístěný filtr pevných částic s vrstvou třícestného katalytického konvertoru. S tímto řešením se lze sekat i pod pojmem čtyřcestný katalytický konvertor. Řízení probíhá pomocí lambda sondy 1. Správná účinnost a hodnota zaplnění se kontroluje za pomocí lambda sondy 2. Pro vyšší efektivitu snižování škodlivých látek je ve výfuku přítomný přídavný třícestný katalyzátor.



Obr. 31 Řez filtrem pevných částic pro zážehové motory [46]

Podobně jako u filtru pro vznětové motory výfukové plyny prochází kanály ve stěnách. Na stěnách je povrchová vrstva z palladia a rhodia, přičemž stěny slouží jako filtrační vložka. U konce otvorů jsou umístěné těsnící zátky z důvodu proudu výfukových plynů přes stěny. Toto proudění způsobí efektivní zachycování pevných částic.
Typy regenerace na úrovní zaplnění filtru:

- Pasivní regenerace probíhá při zaplnění filtru okolo 15% a z bezpečnostního důvodu se aktivuje vždy po ujetí 2 000 km bez ohledu na zaplnění. Do výfukového potrubí je přivedeno určité množství vzduchu pro spálení částic ve filtru. Toto lze provést jen v případě, kdy je konvertor zahřát na svojí provozní teplotu okolo 600 °C.
- Aktivní regenerace je za potřebí při zaplnění od 15% až okolo 55% a doprovází ji varovné upozornění na přístrojové desce. V tomto případě je vhodné, aby řidič následoval postup, který je uveden v příručce k vozidlu. Řídicí jednotka může na základě této regenerace vypnout start/stop systém a zvýšit volnoběžné otáčky motoru v případě stojícího vozidla.
- Servisní regenerace je nutná po zaplnění okolo 70% a výše. Je doprovázena varovným upozorněním a snížením výkonu motoru. V paměti řídicí jednotky je zapsán chybový kód.
- Při zaplnění 100% není servisní regenerace přípustná a je nutné vyměnit filtr pevných částic za nový. [46]

4.3 SPOLEHLIVOST

Vstřikovací soustavu lze považovat za spolehlivou. Servisní úkony se zpravidla provádí nejčastěji při nájezdu několika set tisíc kilometrů. Nejčastějším problémem bývají uhlovodíkové úsady, které zanáší sání z odvětrávání klikové skříně.
V servisním plánu bývá často uváděný interval výměny oleje 30 tisíc km nebo 2 roky podle toho co nastane dříve. Nicméně tento interval se doporučuje zkrátit především z hlediska ztráty mazacích vlastností oleje, zejména při provozu vozidla na krátkých vzdálenostech. [47]

Výhodou je nízká spotřeba paliva za vyšší poskytovaný výkon a točivý moment.
Nevýhodou tohoto systému vstřikování je vyšší citlivost na kontaminaci paliva a zároveň vyšší schopnost usazování uhlovodíkových úsad v sání.

5 PSA 1.5 BLUEHDI

Vznětový motor skupiny PSA Peugeot Citroen. Komerční nástup zahájil při premiéře modelu 308 značky Peugeot v roce 2017. Vyrábí se ve dvou výkonových variantách. Slabší s výkonem 75 kW a točivým momentem 250 Nm. Silnější má výkon 96 kW a točivý moment 300 Nm. Rozdíly mezi těmito motory je zejména v turbodmychadlu. Používají stejný vstřikovací a výfukový systém a jsou náhradou za starší motor 1.6 BlueHDI 120 S&S. V současné době se tento motor montuje do vozidel napříč koncernem PSA.

Obr. 32 Částečný řez motoru 1.5 BlueHDI [48]

Hlavní přednosti a změny oproti předchůdci, z hlediska vstřikování a emisí:

- systém spalování včetně geometrie pístu převzatého z Peugeotu 908, který vyhrál závod 24 hodin v Le Mans.
- zvýšené množství recirkulace spalin v důsledku vyšší účinnosti chladiče zpětného vedení výfukových plynů.
- kompaktní systém redukce emisí v jednom celku.
- umístění SCR a DPF blíže k motoru pro lepší redukci NO_x. [61]

5.1 ČÁSTI SYSTÉMU VSTŘIKOVÁNÍ

1. Vysokotlaké čerpadlo

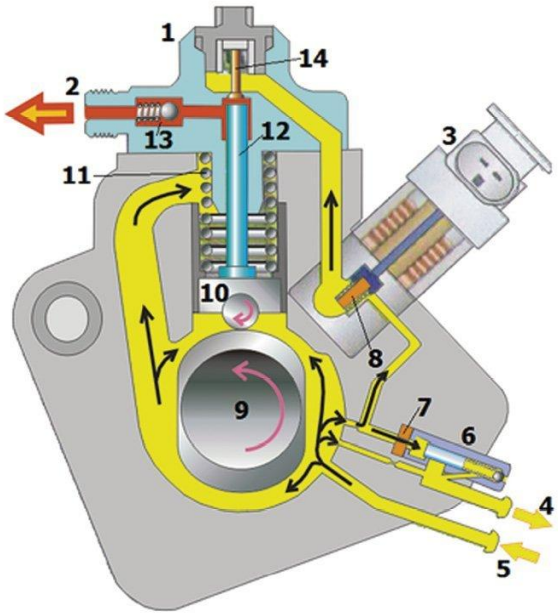
Firmy Bosch s originálním označením CR/CP4S1.

- CR - čerpadlo určené pro systém Common Rail.
- CP4S1 - označení generace čerpadla (CP4). S1 znamená počet elementů stlačující palivo na vysoký tlak (1 pístek).
  Modulární konstrukce umožňuje jeho širokou škálu využití v závislosti na individuálních podmínkách zákazníka. Díky tomu lze tento typ čerpadla najít ve velkém spektru technických řešení. Systémový tlak na části výtlaku je v rozmezí 1 800 až 2 700 barů. U motoru 1.5 BlueHDI je tlak v systému 2 000 barů. Celkem přes 60 milionů čerpadel tohoto typu bylo vyrobeno. [49][61]

Obr. 34 Vysokotlaké palivové čerpadlo Bosch CP4-25/1 E [49]

Obr. 33 Vysokotlaké palivové čerpadlo na motoru [50]

E v tomto případě znamená elektricky ovládaný sací ventil, který napomáhá udržet tlak paliva na výtoku čerpadla při vypnutí motoru. Důvodem aplikace takového ventilu je systém označovaný skupinou PSA S&S (Start&Stop). Každé zastavení by v jiném případě znamenal pokles tlaku paliva na výtoku a start by nebyl plynulý.
Další výhodou je přesnější plnění prostoru stlačování paliva pístkem na rozdíl od čerpadla se samostatnou měřící jednotkou, především ve vyšším spektru otáček. [49]



Obr. 35 Řez vysokotlakého palivového čerpadla Bosch CP4-25/1 [51]

(1) - těleso čerpadla
(2) - výtok vysokého tlaku paliva
(3) - dávkovací ventil paliva
(4) - vratná větev paliva
(5) - přívod nízkotlakého paliva
(6) - vypouštěcí ventil
(7) - jemný filtr
(8) - jemný filtr
(9) - vačková hřídel
(10) - odvalovací element
(11) - vratná pružina
(12) - pístnice
(13) - vývodový ventil
(14) - sací ventil

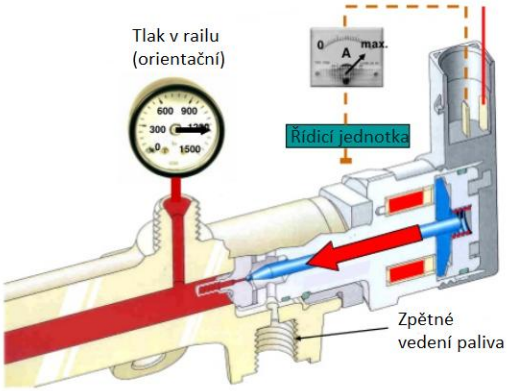
U čerpadla CP4-25/1 E je sací ventil sdružený s dávkovacím a společně ovládány elektricky. Z palivové nádrže je pomocí nízkotlakého (podávacího) čerpadla palivo přiváděno do prostoru vačkové hřídele čerpadla (9). Rotací vačky je palivo rozváděno k vratné pružině pístku (11), přes dávkovací (3) a sací ventil (14) do pracovního prostoru pístku, zpětného vedení (4). Nafta má schopnost mazivosti a tím chrání díly proti otěru. Součástí vedení jsou jemné filtry (7,8), které zajišťují vysokou čistotu paliva. Translačním pohybem pístku (12) se nasáté palivo stlačí. Pohybem válečku směrem do osy rotace vačkové hřídele se sací ventil otevře a nafta je nasávaná. Při opačném pohybu válečku se sací ventil zavře a palivo se stlačuje. Bezpečnostním prvkem je zde vývodový ventil (13). V případě vypnutí motoru kulička dosedne do otvoru výtoku paliva. Tím se tlak dále v systému nemění a všechny vstřikovače mají k dispozici palivo pro následný start motoru.
Jiné typy konstrukce využívají například dva pístky, které stlačují palivo (zejména víceválcové motory), jiný dávkovací ventil, případně jinak umístěné jemné filtry, apod. [52]

2. Zásobník paliva a snímače

Rail je vyrobený firmou CIE Compiegne nebo Bosch. Na railu je umístěn snímač tlaku paliva (lze vidět na obr. 21 na straně palivové lišty) a regulátor tlaku paliva (na druhé straně palivové lišty).

Obr. 36 Pohled na palivovou lištu a snímače tlaku paliva motoru 1.5 BlueHDI [53]

Obr. 38 Regulátor tlaku paliva Bosch PCV3-27 [24]



Obr. 37 Regulátor tlaku paliva v řezu [54]

Snímač tlaku paliva měří okamžitý tlak paliva v zásobníku s jistou přesností v odpovídajícím čase. Poskytuje řídicí jednotce napěťový signál odpovídající velikosti snímaného paliva. Regulátor tlaku paliva má za úkol nastavit a udržet tlak paliva v zásobníku v závislosti na zatížení motoru:

- při příliš vysokém tlaku paliva v zásobníku se regulační ventil otevře a část paliva odtéká zpětných potrubím zpátky do palivové nádrže.
- při příliš nízkém tlaku paliva v zásobníku se regulační ventil uzavře a utěsňuje vysokotlakou stranu vůči nízkotlaké.

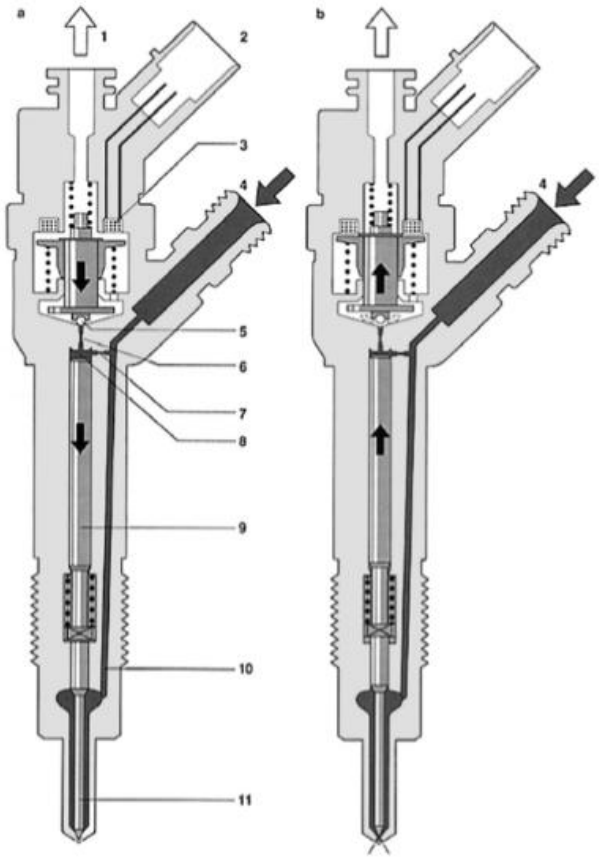
Podobně jako vstřikovač je zde pohyb jehly vytvářen prostřednictvím elektromagnetu. To zajišťuje přesnější a rychlejší regulaci tlaku paliva v railu v závislosti na zatížení motoru. Pro otevření průtoku do zpětného vedení paliva sníží hodnotu napětí vysílající na konektory regulátoru. Dojde k otevření otvoru a palivo protéká zpětným vedením do nádrže. Pro zavřený ventil je nutnost mít napěťový signál. V opačném případě motor zhasne nebo nepůjde nastartovat. [54][9]

3. Vstřikovače

Firmy Bosch s originálním označením CRI2-20.

- CRI2 - kód solenoidových vstřikovačů (Common Rail Injector).
- 20 - číslo má přiřazenou hodnotu tlaku paliva v systému. Konkrétně 20 = 200 MPa.

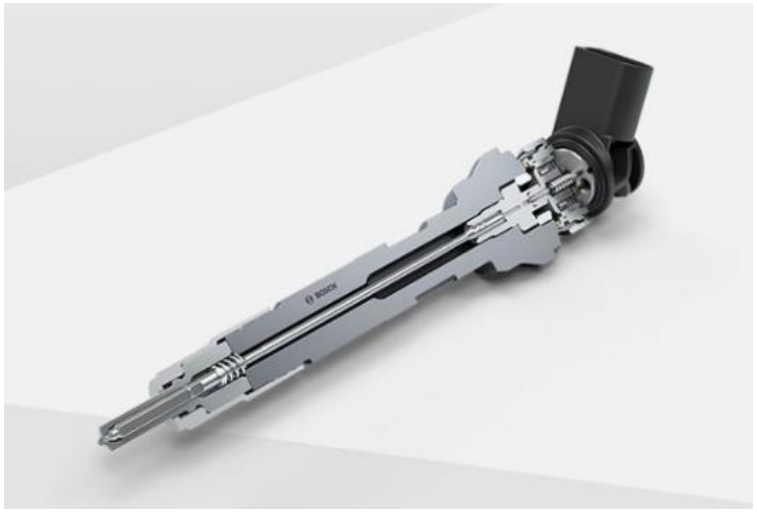
Palivo je vstřikováno při otevření jehly skrze 7 otvory. Umístění těchto otvorů ovlivňuje směr, tvar, rychlost a velikost kapiček vstřikovaného paliva. Podobně jako u vysokotlakého čerpadla lze i tento typ vstřikovače modifikovat pro potřeby zákazníka jako například životnost, tvar trysky, délka vstřikovače a kompatibilita vůči různým typům paliva. Umožňuje za jeden cyklus vstříknout dávky paliva až v 8 samostatných vstřiknutích. Další schopností je snížení časových intervalů mezi vstřiky. Tím lze změnit tvrdost chodu motoru nebo ovládání emisí ve výfuku pro řízení filtru pevných částic apod. [55]



Obr. 39 Řez vstřikovače Bosch CRI2 při zavřené a otevřené jehle trysky [56]

(1) - vratný kanál
(2) - elektrické konektory
(3) - solenoid
(4) - přívod paliva z railu
(5) - kulička ventilu
(6) - vysávací restriktor
(7) - sací restriktor
(8) - řídicí komora ventilu
(9) - píst
(10) - přívod k trysce
(11) - jehla trysky

Palivo proudí skrze přívod paliva z railu (4) při vysokém tlaku do řídicí komory ventilu (8). Píst (9) je tlačen tlakem a vstřikovač je uzavřen. Jestliže na solenoidu (3) bude napětí z řídicí jednotky, tak se kulička ventilu (5) zvedne a palivo z řídicí komory ventilu (8) proudí přes vratný kanál (1) zpět do nádrže. Jestliže je tlak nižší v komoře nižší než v přívodu k trysce (10), tak se zvedne píst (9) společně s jehlou trysky (11) a palivo je vstřikováno do spalovacího prostoru. [56]



Obr. 40 Řez vstřikovačem Bosch CRI2 [55]

5.2 EMISNÍ LIMITY A ZPŮSOB JEJICH PLNĚNÍ

Již v roce 2017 dosahoval motor koeficientu shody NO_x 1,5 v souvislosti s metodikou měření RDE (Real Driving Emission). V tomto roce platila norma vyžadující tento koeficient maximálně na hodnotě 2,1. Toto číslo udává násobek naměřených emisí dusíku v reálném provozu vůči hodnotě stanovenou limitem (lze považovat za toleranci).

Emisní norma pro rok 2020:

- koeficient shody NO_x a pevných částic max 1,5
- max 130 g/km CO_2

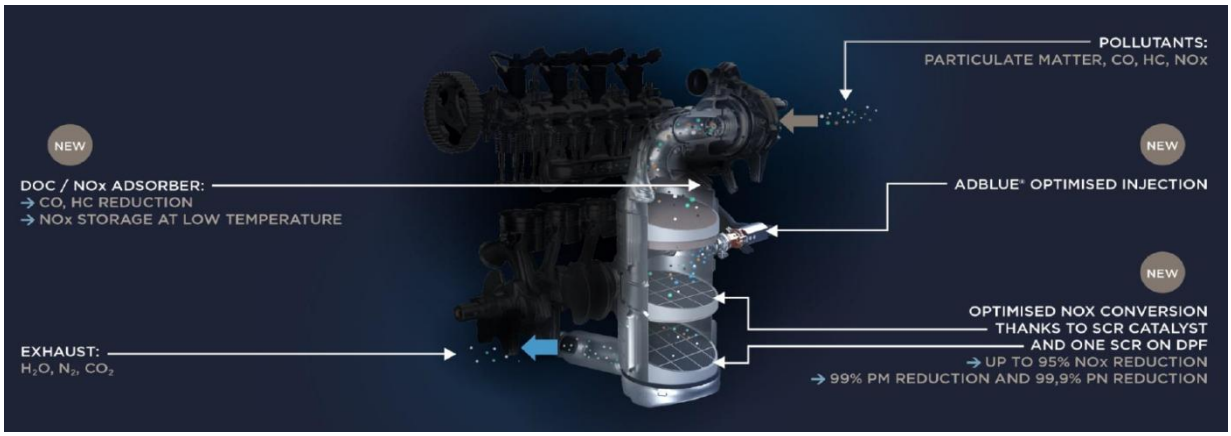
Euro 6 emissions limits (g/km)		
	Benzin	Nafta
CO Carbon Monoxide	1.0	0.5
NOx Nitrogen Oxides	0.06	0.08
PM Particulate Matter	0.005*	0.005

Obr. 41 Limity emisí předepsané normou Euro 6d - TEMP [57]

Roku 2021 se předpokládá snížení tohoto koeficientu na hodnotu 1,43 pro vznětové motory. Průměrné hodnoty CO_2 budou maximálně 95 g/km. [57][58]
1.5 BlueHDI 130 s manuální šestistupňovou převodovkou vypouští do ovzduší průměrně 122 g/km CO_2 dle metodiky WLTP.

Na rozdíl od staršího testovaní NEDC (New European Driving Cycle) se do výsledků testu zařazuje i individuální výbava vozu, delší měření a celková bližší simulace běžného provozu vozidla. V tomto případě naměřili jiné průměrné hodnoty CO_2 vozidla s tímto motorem, konkrétně 91 g/km při kombinovaném provozu. [59][60]

Pro plnění současných limitů je součástí výfukového potrubí systém, který snižuje obsah škodlivin ve výfukových plynech. Soustavu tvoří oxidační a selektivní katalytický konvertor se vstřikováním AdBlue společně s filtrem pevných částic.



Obr. 42 Způsob snižování emisí motoru 1.5 BlueHDI [61]

Celý systém redukce emisí je konstrukčně jako jeden celek.

1. část - Z turbodmychadla míří výfukové plyny nejdříve do oxidačního katalytického konvertoru, kde se redukuje obsah oxidu uhelnatého a nespálených uhlovodíků. V kombinaci s absorpčním konvertorem se zde zachycují oxidy dusíku při provozu studeného motoru.
2. část - Vstřikování Adblue do SCR konvertoru, kde se snižuje obsah oxidu dusíku.
3. část - Kombinace filtru pevných částic společně s aktivní vrstvou SCR konvertoru.

Dříve motor 1.6 BlueHDI využíval DPF se vstřikováním aditiv. 1.5 BlueHDI používá DPF bez nutnosti aditiv, čímž se zejména zvýšil komfort při provozu vozidla. Navíc má Adblue nově plnící otvor vedle hrdla nádrže nafty. [48]

5.3 Životnost a spolehlivost palivové soustavy

Bosch udává u systému CRS2 (Common Rail Systems) životnost 300 000 km pro osobní vozidla, případně 400 000 km pro lehká užitková vozidla. Celkově závisí na mnoha faktorech zejména čistotě paliva, způsobu provozu vozidla, apod.
V případě čerpadla CP4 jsou zaznamenány problémy u koncernu GM (General motors) v Americe. Ovšem jedná se o dvou pístové čerpadlo a problémy souvisí s mazacími schopnostmi paliva. Solenoidové vstřikovače se dají naopak „levně“ repasovat a náklady na výrobu nejsou tak velké jak v případě piezoelektrických. Rail, snímače a redukční ventily se již dříve ukázaly jako spolehlivější součástky na rozdíl od zmiňovaných vstřikovačů nebo čerpadel. [63][62][64]
Výhodou jsou nižší emise a spotřeba paliva, vyšší poměr výkonu vůči objemu válců, atp.
Nevýhodou je složitější elektrická síť a její řízení, včetně diagnostiky případné poruchy.

ZÁVĚR

V této práci jsem nejprve popsal systém přímého vstřikování paliva obecně jak pro zážehové, tak vznětové motory osobních automobilů. Popis systému zahrnuje přehled hlavních prvků přímého vstřikování, samotný proces spalování a způsob snižování emisí ve výfukových plynech. Nakonec nejčastější závady spojené s tímto typem vstřikování.

Další část práce je věnovaná popisu prvků systému vstřikování včetně způsobu snižování emisí na dvou konkrétních pohonných jednotkách. Zážehový motor jsem vybral 1.0 TSI z řady EA211. Jedním z hlavních důvodů mé volby je jeho velká aplikace napříč koncernem VW a modernizace, která sebou přinesla využití filtru pevných částic, vyššího vstřikovacího tlaku paliva a víceotvorových vstřikovačů. Vznětovému motoru se věnuji prostřednictvím 1.5 BlueHDI od společnosti PSA. Vybral jsem ho zejména kvůli nabízenému výkonu vůči zdvihovému objemu. Oproti předchůdci se vyznačuje absencí speciálních aditiv pro redukci emisí a nižší spotřebou paliva. Podobně jako motor 1.0 TSI je 1.5 BlueHDI aplikován do téměř všech modelů osobních automobilů nabízených koncernem PSA.

Dokončením této práce a následným porovnáním systémů přímého vstřikování zážehového a vznětového motoru si lze všimnout jejich vzájemné podobnosti, ačkoliv oba motory spalují jinak připravenou směs. Dnes se od sebe liší vlastnostmi paliv a systémovými tlaky, které mohou být v případě vznětového motoru až 10násobné a tím spjatá robustnost součástí ve vysokotlaké větvi vstřikování. Vzhledem k takto vysokým systémovým tlakům je vhodné pro vysokou životnost všech součástek vstřikování tankovat kvalitnější palivo, případně s dalšími aditivy zlepšující jeho vlastnosti.

Vývoj vstřikovacích systémů se dnes mění společně s emisními požadavky a není již tak extrémní jak před několika lety. Zejména z hlediska finanční návratnosti se nejeví, že by tyto systémy prošly dalšími vylepšeními. Moderním trendem se stala synchronizace spalovacího motoru s elektromotorem.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. Automobilová paliva. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.

[2] Pfi-vs-gdi. In: *Lucasoil* [online]. Lucas Oil Products, ©2018, 2018 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://lucasoil.com/gdi/

[3] FERENC, Bohumil. Spalovací motory: karburátory a vstřikování paliva. Praha: Computer Press, 2004. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 80-251-0207-6.

[4] BEECHAM, Matthew. RESEARCH ANALYSIS: A review of gasoline direct injection systems. *Just - auto* [online]. 2007 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.just-auto.com/analysis/a-review-of-gasoline-direct-injection-systems_id93295.aspx

[5] LÁNÍK, Ondřej. Frankfurt živě: Common-rail 4. generace od Bosche. Auto [online]. ©2001-2020, 2005 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.auto.cz/frankfurt-zive-common-rail-4-generace-od-bosche-15247

[6] Směšovací poměr a emise. In: *Skola - auto* [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.skola-auto.cz/wp-content/uploads/2018/03/Smesovaci_pomer.pdf

[7] EMISE Z VYFUKOVÝCH PLYNŮ MOTOROVÝCH VOZIDEL. In: Cv.vscht [online]. [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://cv.vscht.cz/files/uzel/0014041/0013~~c83NLE5VKDu8N600Ox9IJWcoFORU5h1dDwA.pdf?redirected

[8] FREI, Martin. Vše o katalyzátorech: Víte, jaké „bandasky“ máte ve svém autě a proč ? *Auto* [online]. 2018 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.auto.cz/vse-o-katalyzatorech-vite-jake-bandasky-mate-ve-svem-aute-a-proc-125474

[9] ZDENĚK, Jan a Ždánský BRONISLAV. AUTOMOBILY: Příslušenství. 3. vydání. Brno: Avid, 2010. ISBN 9788087143162.

[10] Gasoline-Direct-Injection-GDI-System-Market-1. In: *IGR NEWS* [online]. IGR News, ©2019, 2018 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: http://www.igrnews.com/gasoline-direct-injection-gdi-system-market-global-market-size/

[11] Audi 2.0 FSI: Benzin-Direkteinspritzung. In: *MyCarForum* [online]. [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://www.mycarforum.com/forums/topic/1098852-air-intake-tumble/

[12] Informace o automobilové technice: Benzínové systémy. In: *Bosch* [online]. Robert Bosch, ©2019, 2019 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://aa.bosch.cz/Autoprislusenstvi/prehled-produktu/benzinove-systemy.html

[13] RAYAX. Řez vstřikovacím čerpadlem. In: Dieselpower [online]. phpBB Group, ©2001-2004, 2. dubna 2018 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: https://dieselpower.cz/forum/viewtopic.php?p=1200767&sid=a57bc3701234e2eae7b6332079b4a058

[14] Gasoline direct injection: Key technology for greater efficiency and dynamics. In: *BOSCH* [online]. Stuttgart: Robert Bosch, 2013 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: http://www.bosch.co.jp/tms2015/en/products/pdf/Bosch_di_folder.pdf

[15] APR 2.5 TFSI High Pressure Fuel Pump (HPFP). In: *VRS Performance* [online]. VRS Northampton, ©2017 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://www.vrsnorthampton.co.uk/home/88-apr-25-tfsi-high-pressure-fuel-pump-hpfp.html

[16] Fuel Rail. In: *Bosch - automotive* [online]. Robert Bosch [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://rs.bosch-automotive.com/en/parts_and_accessories_7/motor_and_sytems_3/benzin_4/injection_system_4/fuel_rail_3/fuel_rail_1

[17] Equipment for High Performance Vehicles: Edition 2020 Bosch Motorsport. In: Bosch Motorsport [online]. Bosch Engineering, 2019 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.bosch-motorsport.com/media/downloads/catalogs/printkatalog_2020.pdf

[18] HP Injection Valve HDEV 5.2. In: *Bosch-motorsport* [online]. Abstatt: Bosch Engineering, 2020 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: http://www.bosch-motorsport.de/content/downloads/Raceparts/Resources/pdf/Data%20sheet_67828491_HP_Injection_Valve_HDEV_5.2.pdf

[19] SEYMON. Egr-funkce. In: *BlogAUTO* [online]. 2016 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: https://blogauto.cz/egr-ventil/

[20] Katalyzátor. In: *Zákruta* [online]. People For Net [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.zakruta.cz/slovnik-pojmu/pojem/katalyzator/

[21] Gasoline particulate filters: Engineering for lower vehicle emissions. Infineum Insight [online]. ©2020, 2018 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/passenger-cars/gasoline-particulate-filters/

[22] ŠIKL, Petr. O motorech typu Common Rail. *TipCars* [online]. EBM system, 2020, 2006 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/o-motorech-typu-common-rail.html

[23] First generation Bosch Common Rail for cars, 1997. In: *Bosch* [online]. Robert Bosch, 2018 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/first-generation-bosch-common-rail-for-cars-1997-151736.html

[24] High-pressure rail for common-rail systems. In: *Bosch Mobility Solutions* [online]. Robert Bosch, ©2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/common-rail-system-piezo/high-pressure-rail/

[25] Common-rail system with solenoid injectors: Diesel injection system CRS2-25 for a maximum pressure up to 2,500 bar. *Bosch Mobility Solutions* [online]. Robert Bosch, ©2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/common-rail-system-solenoid/

[26] Common-rail system with piezo injectors: Diesel injection system CRS3-27 for a maximum pressure up to 2,700 bar. *Bosch Mobility Solutions* [online]. Robert Bosch, ©2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/common-rail-system-piezo/

[27] KONRAD, Reif, ed. *Fundamentals of automotive and engine technology*. 1. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014. ISBN 978-3-658-03971-4.

[28] ASLAN REŞITOĞLU, İbrahim. Diesel oxidation catalyst. In: *ResearchGate* [online]. ResearchGate, ©2008-2020, 2015 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Diesel-oxidation-catalyst_fig2_293794340

[29] Selective Catalytic NOx Reduction (SCR). In: HUG Engineering [online]. HUG Engineering, 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://hug-engineering.com/en/technologies/scr-reduction

[30] VAG SSP 424: Exhaust Gas Aftertreatment System Selective Catalytic Reduction. In: ProCarManuals [online]. ©2017-2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://procarmanuals.com/vag-ssp-424-exhaust-gas-aftertreatment-system-selective-catalytic-reduction/

[31] SAJDL, Jan. DPF (Diesel Particulate Filter). Autolexicon [online]. ©2020 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.autolexicon.net/cs/articles/dpf-diesel-particulate-filter/

[32] Vše o filtrech pevných částic DPF. In: *DPF Technology* [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.dpf-tech.cz/filtry-pevnych-castic

[33] VÝROBNÍ JUBILEUM V MLADÉ BOLESLAVI: ŠKODA AUTO vyrobila 2 500 000. motor řady EA211. *Škoda Auto* [online]. ŠKODA AUTO, 2020, 2019 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.skoda-auto.cz/novinky/novinky-detail/2019-05-24-vyrobni-jubileum-v-mb

[34] DITTRICH, Lukáš. Co byste měli vědět o motoru 1.0 TSI, než začnete nadávat na litrovou Octavii. In: *Autobible* [online]. Mladá fronta, ©2020, 2017 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://autobible.euro.cz/byste-meli-vedet-motoru-1-0-tsi-nez-zacnete-nadavat-litrovou-octavii/

[35] VAG SSP 539: 1.0L 3-Cylinder TSI Engine. In: *ProCarManuals* [online]. ProCarManuals, ©2017-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://procarmanuals.com/vag-ssp-539-1-0-l-3-cylinder-tsi-engine-design-function/

[36] VAG SSP 511: The new EA211 Petrol Engine Family. In: *ProCarManuals* [online]. ProCarManuals, ©2017-2020 [cit. 2020-06-02]. Dostupné z: https://procarmanuals.com/vag-ssp-511-new-ea211-petrol-engine-family/

[37] SAJDL, Jan. TSI (Twincharged Stratified Injection). In: *Autolexicon* [online]. autolexicon.net, ©2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.autolexicon.net/cs/articles/tsi-twincharger-stratified-injection/

[38] High Pressure Fuel Pump. In: *Hitachi* [online]. Hitachi Automotive Systems Americas, ©1995-2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.hitachi-automotive.us/Products/oem/EMS/HPFuelPump/index.htm

[39] PEKÁREK, Jiří. Vačkové hřídele a vahadla. In: *Auto* [online]. CZECH NEWS CENTER, ©2001-2020, 2019 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.auto.cz/galerie/novinky/74810/skoda-rapid-po-100-000-km-rozebrali-jsme-ji-do-sroubku?foto=2

[40] NEU Kraftstoffverteiler mit Sensor für Audi Seat Skoda VW 1.0 TSI ORIGINAL CHZ. In: *Ebay* [online]. eBay, ©1995-2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.ebay.com/itm/NEU-Kraftstoffverteiler-mit-Sensor-fur-Audi-Seat-Skoda-VW-1-0-TSI-ORIGINAL-CHZ/382407982618?hash=item59094abe1a:g:8MUAAOSwaXpbz0iJ

[41] High-pressure sensor: Precise media pressure measurement for gasoline direct injection, natural gas and hydraulic systems. *Bosch Mobility Solutions* [online]. Robert Bosch, ©2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/commercial-vehicles/powertrain-systems/natural-gas/high-pressure-sensor/

[42] Piezoelectric pressure sensors. *Avnet* [online]. Avnet, ©2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/core-technologies/piezoelectric/

[43] Einspritzdüse Injektor Audi Seat Skoda VW 1.0 TSI TFSI 04E906036R CHZ. In: *Ebay* [online]. eBay, ©1995-2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.ebay.com/itm/Einspritzduse-Injektor-Audi-Seat-Skoda-VW-1-0-TSI-TFSI-04E906036R-CHZ/152947481343?hash=item239c615aff:g:DBcAAOSwfqFaq~gv

[44] REIF, Konrad. *Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme* [online]. 6. Auflage. Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2011, 595 s. [cit. 2020-05-31]. ISBN 9783834812742. Dostupné z: https://epdf.pub/queue/bosch-autoelektrik-und-autoelektronik-bordnetze-sensoren-und-elektronische-syste.html

[45] Euro 6d-Temp: Pro nově registrovaná vozidla nyní povinné. *Blog.wm* [online]. WM SE, 2019 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.blog.wm.de/details-cz/euro-6d-temp-pro-nově-registrovaná-vozidla-nyní-povinné

[46] VAG SSP 558: Close-Coupled Petrol Particulate Filter. In: *ProCarManuals* [online]. ProCarManuals, ©2017-2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://procarmanuals.com/vag-ssp-558-close-coupled-petrol-particulate-filter/

[47] NÁVOD K OBSLUZE: Vozidlo a Infotainment ŠKODA RAPID SPACEBACK. In: *Škoda Auto* [online]. ŠKODA AUTO, 2017 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://ws.skoda-auto.com/OwnersManualService/Data/cz/Rapid_Spaceback_NH/05-2017/Manual/Rapid/A05_Rapid_Spaceback_OwnersManual.pdf

[48] DUSIL, Tomáš. Nový motor PSA 1.5 BlueHDI je nabitý nejnovějšími technologiemi. Projdeme si je všechny! *Auto* [online]. CZECH NEWS CENTER, ©2001-2020, 2018 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.auto.cz/novy-motor-psa-1-5-bluehdi-je-nabity-nejnovejsimi-technologiemi-projdeme-si-je-vsechny-124641

[49] High-pressure pump CP4/CP4N: For very high motor performance with low consumption. *Bosch Mobility Solutions* [online]. Robert Bosch, ©2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/common-rail-system-piezo/high-pressure-pump-cp4/

[50] PEUGEOT PARTNER ENGINE DV5RC. In: *RRR* [online]. 2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://rrr.lt/en/used-part/sbr3785-dv5rc-peugeot-partner-engine

[51] Camshaft for Bosch cp4-1 common rail pumps fitted to Hyundai. In: *Diesel Injection Pumps* [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://injectionpumps.co.uk/product/camshaft-for-bosch-cp4-1-common-rail-pumps-fitted-to-hyundai/

[52] KRAFTFAHRZEUGTECHNIK PUR. Das Common-Rail-System: Bauteile und Funktion. In: *Youtube* [online]. 7. února 2018. [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=7vaYWF6pxFw

[53] Peugeot 308 3008 Engine 1.5 HDI Diesel YHZ DV5RC Code 96bhp Fits 2017 - 2019. In: *EBay* [online]. eBay, ©1995-2020 [cit. 2020-06-05]. Dostupné z: https://www.ebay.co.uk/itm/Peugeot-308-3008-Engine-1-5-HDI-Diesel-YHZ-DV5RC-Code-96bhp-Fits-2017-2019-/153610810713?nma=true&si=7wWUEmLPtxKGcgDl%252FYcCvgDrFuw%253D&orig_cvip=true&nordt=true&rt=nc&_trksid=p2047675.l2557

[54] KITCHEN, Tony. Common rail diesel fuel systems. In: Slideshare [online]. 2017 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.slideshare.net/AybMechatronics/common-rail-diesel-fuel-systems-74385841

[55] Solenoid valve injector for common-rail systems: Precision fuel injection for high performance. *Bosch Mobility Solutions* [online]. Robert Bosch, ©2020 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/powertrain-systems/common-rail-system-solenoid/solenoid-valve-injector-cri2/

[56] LAMADRID FERNANDEZ, Artiom. *Integration of a CR Injector in a Research Diesel Engine and Investigation of a Multiple Injection* [online]. Stockholm, 2010 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:460075/FULLTEXT01.pdf. Master of Science Thesis. KTH Industrial Engineering and Management Machine Design.

[57] RYBECKÝ, Vladimír. Přehled o WLTP, RDE a Euro 6d-TEMP. *Autonoviny* [online]. Automedia News, ©2020, 2018 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://www.autonoviny.cz/clanek/34612-prehled-o-wltp-rde-a-euro-6d-temp

[58] MOCK, Peter. EU CO2 standards for passenger cars and light.commercial vehicles. In: *International Council on Clean Transportation* [online]. ©2020, 2014 [cit. 2020-05-30]. Dostupné z: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCTupdate_EU-95gram_jan2014.pdf

[59] PEUGEOT 308: CENÍK. In: *Peugeot* [online]. P Automobil Import, 2016 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://peugeot.ecpaper.cz/osobni/308-NEW/308-NEW/Peugeot-308-NEW-cenik/?page=1

[60] LAŽANSKÝ, Milan. WLTP: Noční můra výrobců aut je tady. Co znamená pro nové motory ? *Autorevue* [online]. CZECH NEWS CENTER, ©2019, 2018 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.autorevue.cz/wltp-wiki-cyklus-rozdil-nedc

[61] MAREZ, Patrice. LES MOTEURS PSA EURO 6 DE DEUXIEME GENERATION ET LES PERSPECTIVES AU DELA DE 2020. In: Arts&Métiers [online]. 2017 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.arts-et-metiers.asso.fr/manifestation_cr/cr_3810.pdf

[62] Diesel systems: Common Rail Systems CRS2 with 1,600 to 2,000 bar and solenoid injectors. In: *Bosch autoparts* [online]. Stuttgart: Robert Bosch, 2012 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.boschautoparts.com/documents/101512/0/0/1126ea78-84e4-4116-967d-26d24335fac1

[63] MCELRATH, KJ. What Causes the Bosch CP4 Pump to Fail ? *Top Class Actions* [online]. Top Class Actions, ©2020, 2019 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://topclassactions.com/lawsuit-settlements/consumer-products/auto-news/what-causes-the-bosch-cp4-pump-to-fail/

[64] VACULÍK, Martin. Dieselová Pro a Proti VIII: Opravy vstřikovačů common railu. *Auto* [online]. CZECH NEWS CENTER, ©2001-2020, 2012 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: https://www.auto.cz/dieselova-pro-a-proti-viii-opravy-vstrikovacu-common-railu-67684

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

DPF	Diesel Particulate Filter
ECU	Electronic Control Unit
EDC	Electronic Diesel Control
EGR	Exhaust Gas Recirculation
ESP	Electronic Stability Program
ETC	Electronic Transmission Control
GDI	Gasoline Direct Injection
GPF	Gasoline Particulate Filter
NEDC	New European Driving Cycle
PDE	Pumpe Düse Einheit
PLD	Pumpe Leitung Düse
RDE	Real Driving Emission
SCR	Selectiv Catalytic Reduction
TCS	Traction Control System
TSI	Turbo Stratified Injection
WLTP	Worldwide harmonized Light - duty vehicles Test Procedure