



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

**VSTŘIKOVACÍ SYSTÉM S TLAKOVÝM
ZÁSOBNÍKEM PRO POHONNÉ JEDNOTKY
UŽITKOVÝCH APLIKACÍ**

INJECTION SYSTEM WITH PRESSURE ACCUMULATOR FOR COMMERCIAL POWERTRAIN UNITS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Suchánek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **David Suchánek**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radim Dundálek, Ph.D.**
Akademický rok: 2022/23

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:

Vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem pro pohonné jednotky užitkových aplikací

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Uvedení přehledu jednotlivých komponentů systému, popis jejich funkce a způsobu ovládání. Výhody a nevýhody s ohledem na optimalizaci průběhu spalovacího procesu a snižování škodlivin ve výfukových plynech. Specifické součásti palivového systému. Příklady řešení systému u konkrétních pohonných jednotek.

Cíle bakalářské práce:

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Zamyšlení nad perspektivou budoucího vývoje vstřikovacích systémů typu common-rail určených pro pohonné jednotky užitkových aplikací s ohledem zvyšování vstřikovacího tlaku a snižování škodlivin ve výfukových plynech. Důraz na aktuální řešení v současné sériové výrobě.

Seznam doporučené literatury:

REIF, Konrad. Diesel engine management: systems and components. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 9783658039806.

MAJEWSKI, W. A., KHARI, K. M. Diesel Emissions and Their Control, SAE International, 2006, 561 s., ISBN 0768006740, 9780768006742.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená práce se zabývá vstřikovacím systémem s tlakovým zásobníkem pro pohonné jednotky užitkových aplikací. V rámci řešení práce proběhla komplexní analýza vstřikovacího systému s uvedením principu a funkce nezbytných komponent, včetně předvedení na konkrétních vozidlech a nastínění budoucího vývoje. Systém vstřikování je možné rozdělit do 3 částí: nízkotlaká, vysokotlaká a řídicí. Nízkotlaká část popisuje palivový filtr a podávací čerpadlo. V rámci vysokotlaké části jsou uvedeny v souvislostech komponenty, jimiž jsou vstřikovač, vysokotlaké čerpadlo a tlakový zásobník. Řídicí část pak představuje řídicí jednotku, snímače a akční členy nezbytné pro řízení tlaku a množství paliva. Pro uvedení uceleného přehledu systému vstřikování s tlakovým zásobníkem bylo provedeno měření a vyhodnocení parametrů systému common rail na konkrétní pohonné jednotce pomocí diagnostického zařízení. Měření se ověřil maximální deklarovaný tlak výrobcem vozidla, současně byl ukázán průběh tlaku paliva v tlakovém zásobníku v různých režimech provozu motoru.

KLÍČOVÁ SLOVA

vstřikování paliva, common rail, vznětový motor, tlakový zásobník, vstřikovač, čerpadlo

ABSTRACT

The present work deals with a common-rail fuel injection system for powertrain applications. As part of the solution of the thesis, a comprehensive analysis of the injection system has been carried out with an indication of the principle and function of the necessary components, including demonstrations on specific vehicles and an outline of future developments. The injection system can be divided into 3 parts: low pressure, high pressure and control. The low-pressure section describes the fuel filter and feed pump. Within the high-pressure part, the components which are the injector, the high-pressure pump and the fuel rail are given in context. The control section then presents the control unit, sensors and actuators necessary to control the pressure and quantity of fuel. In order to give a comprehensive overview of the common-rail fuel injection system, the common-rail system parameters were measured and evaluated on a specific power unit using diagnostic equipment. The measurements verified the maximum pressure declared by the vehicle manufacturer, while showing the fuel pressure waveform in the fuel rail in different engine operating modes. style.

KEYWORDS

fuel injection, common-rail, diesel engine, fuel rail, injector, pump

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SUCHÁNEK, David. *Vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem pro pohonné jednotky užitkových aplikací* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149844>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Radim Dundálek.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 20. května 2023

.....

David Suchánek

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Radimu Dundálkovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za jeho odborné rady, cenné připomínky a ochotu při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za jejich neustálou podporu a povzbuzení během studia.

OBSAH

Úvod	10
1 Princip funkce vstřikovacího systému s tlakovým zásobníkem	11
1.1 Dodávka paliva	11
1.2 Filtrace paliva	11
1.3 Tvorba tlaku	11
1.4 Regulace tlaku paliva	12
1.4.1 Regulace tlaku paliva ve vysokotlaké části systému ventilem.....	12
1.4.2 Regulace tlaku paliva na sací straně	12
1.5 Vstřikování paliva	13
1.5.1 Pilotní vstřík	13
1.5.2 Hlavní vstřík	13
1.5.3 Dodatečný vstřík.....	13
1.6 Kontrola a řízení	13
1.7 Schéma systému common-rail	14
2 Nízkotlaká část	15
2.1 Palivový filtr	15
2.2 Podávací čerpadlo	16
2.2.1 Elektrické palivové čerpadlo	16
2.2.2 Zubové čerpadlo	18
3 Vysokotlaká část	19
3.1 Vysokotlaké čerpadlo	19
3.1.1 Radiální čerpadlo	20
3.1.2 Řadové dvoupístové čerpadlo.....	21
3.2 Vstřikovač	23
3.2.1 Elektromagnetický vstřikovač	24
3.2.2 Piezoelektrický vstřikovač.....	25
3.3 Vysokotlaký zásobník a potrubí	27
4 Elektronické řízení vznětových motorů	29
4.1 Akční členy	30
4.2 Senzory	31
4.3 Řídící jednotka motoru	33
5 Budoucí vývoj	34
6 Konkrétní aplikace	35
6.1 Scania R590	35
6.2 Mercedes-Benz Sprinter	37
6.3 MAN TGX	38
6.4 Další aplikace.....	39
Závěr	40
Použité informační zdroje	41

Úvod

V posledních několika letech došlo v automobilovém průmyslu k výraznému zlepšení v oblasti vývoje inovativních řešení, která jsou schopna plnit stále přísnější mezinárodní předpisy, pokud jde o snižování emisí CO₂ a znečišťujících látek. Jedna z hlavních oblastí výzkumu v oblasti vznětových motorů se zabývá vývojem systémů vstřikování paliva s tlakovým zásobníkem (common rail) a souvisejících strategií vstřikování paliva.

Žádný jiný spalovací motor není tak univerzální jako vznětový motor. Jeho všestrannost lze přičíst především vysoké účinnosti a s tím související hospodárnosti. Požadavky na vstřikovací systémy vznětových motorů se neustále zvyšují: vyšší tlaky, rychlejší spínací časy a pružné přizpůsobení průběhu vstřikování provozním podmínkám činí vznětový motor hospodárným a výkonným. Diesellové pohonné systémy se vstřikovacími systémy common rail v kombinaci s účinným čištěním výfukových plynů mohou tvořit základ úsporných a ekologicky nezávadných vozidel.

Hlavní výhodou systému common rail je obrovská flexibilita v možnostech nastavení časování vstřikování, které je dosaženo oddělením systémů tvorby tlaku a vstřikování. Palivo je trvale udržováno pod vysokým tlakem připraveným ke vstřiku. Tlak je vytvářen vysokotlakým čerpadlem. Palivová lišta namontovaná na motoru slouží jako vysokotlaký zásobník. Odtud je palivo rozváděno k jednotlivým vstřikovačům, umístěným v hlavě válců. Časování vstřikování a množství paliva se řídí individuálně pro každý válec.

Uvedením přehledu jednotlivých komponent systému, popisem jejich funkce a ovládání bylo umožněno zhodnotit systém vstřikování s tlakovým zásobníkem, včetně nastínění budoucího vývoje. Žádaným výstupem bylo i uvedení řešení systému vstřikování pro konkrétní vozidlo, včetně ověření deklarovaného tlaku paliva výrobcem.

1 PRINCIP FUNKCE VSTŘIKOVACÍHO SYSTÉMU S TLAKOVÝM ZÁSOBNÍKEM

Systém vstřikování paliva s tlakovým zásobníkem používaný u vznětových motorů lze rozdělit v návaznosti na literaturu [1] do tří částí:

- Nízkotlaká část
- Vysokotlaká část
- Řídící část

Komponenty nízkotlaké části, tedy podávací čerpadlo a palivový filtr, zajišťují dostatečný přísun paliva v požadované čistotě z palivové nádrže pro klíčové (vysokotlaké) součásti systému common rail, sestávající se ze vstřikovacího čerpadla, tlakového zásobníku a vstřikovačů. Řídící část, sestávající se z čidel monitorující aktuální provozní podmínky, akčních členů regulující tlak paliva v systému a samotné řídicí jednotky, zajišťuje správnou funkci všech komponent vstřikování. [1]

1.1 DODÁVKA PALIVA

Pro pohonné jednotky užitkových aplikací probíhá dodávka paliva pro vysokotlakou část ve většině případů pomocí zubového čerpadla. U menších užitkových vozidel je použito elektrické podávací čerpadlo.

V případě vozidel využívající elektrické podávací čerpadlo, je čerpadlo umístěno v palivové nádrži. Palivo je nasáváno skrze sítko zabráňující vstupu hrubých nečistot ihned po zapnutí zapalování.

Zubové čerpadlo je nedílnou součástí vysokotlakých čerpadlem. Dodávka paliva začíná až po nastartování motoru. Průtok paliva čerpadlem je závislý na otáčkách motoru. Maximální výkonnost čerpadla dosahuje až 400 l/h při tlaku 7 barů [2].

V omezené míře se využívá i kombinace elektrického podávacího čerpadla společně se zubovým čerpadlem. Elektrické podávací čerpadlo zvyšuje odezvu při startování, zejména při teplejších startech, kdy je palivo řidší. Tato konfigurace je však příliš nákladná. [1]

1.2 FILTRACE PALIVA

V případě lehkých užitkových vozidel s elektrickým podávacím čerpadlem se palivový filtr nachází mezi podávacím a vysokotlakým čerpadlem. Tato konfigurace je použita i u osobních vozidel. Užitková vozidla využívající zubové čerpadlo mají palivový filtr umístěný taktéž na tlakové straně, tj. mezi vstřikovacím a zubovým čerpadlem. [1]

1.3 TVORBA TLAKU

Pro systém vstřikování paliva common rail je typickým znakem oddělená funkce vstřikování paliva a tvorba tlaku paliva. Tyto dvě funkce jsou odděleny společným tlakovým zásobníkem. Stlačené palivo je právě v tomto zásobníku udržováno, a to nezávisle na otáčkách motoru a vstřikovaném množství paliva. Tvorba tlaku probíhá v plynule pracujícím vysokotlakém čerpadle poháněném rozvodovým mechanismem motoru. Díky téměř rovnoměrnému průběhu vstřikování, je výsledné zatížení čerpadla mnohem nižší v porovnání s čerpadly pro konvenční

vstřikování paliva. Pohonné jednotky větších objemů se osazují řadovými vysokotlakými čerpadly. Lehká užitková vozidla využívají radiální pístová čerpadla. [1]

1.4 REGULACE TLAKU PALIVA

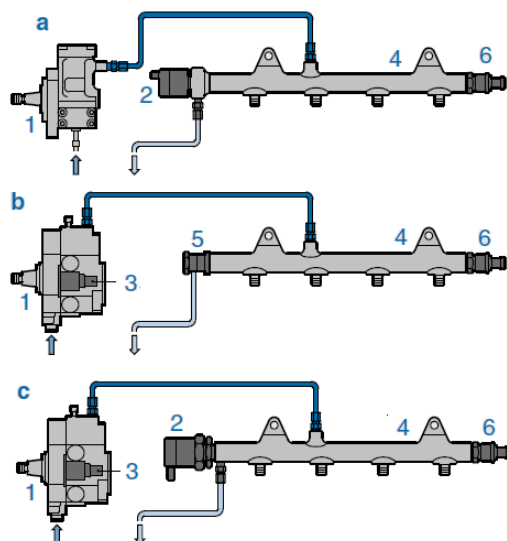
Regulace tlaku paliva probíhá buď ventilem regulace tlaku ve vysokotlaké části systému vstřikování (viz Obr. 1a), nebo dávkovací jednotkou na sací straně (viz Obr. 1b). Stále vyšší důraz na snížení produkce emisí nutí výrobce regulovat tlak paliva pomocí kombinace těchto dvou systémů (viz Obr. 1c). Výsledkem je velice rychlé přizpůsobení tlaku paliva provozním podmínkám, při snížení energetické náročnosti vysokotlakého čerpadla. [2]

1.4.1 REGULACE TLAKU PALIVA VE VYSOKOTLAKÉ ČÁSTI SYSTÉMU VENTILEM

Požadovaný vstřikovací tlak se reguluje pomocí ventilu umístěném nejčastěji na vysokotlakém zásobníku. Přepouštěním přebytečného paliva zpět do palivové nádrže skrze ventil dochází k regulaci tlaku ve vysokotlaké části systému. Výhodou tohoto způsobu regulace je rychlá odezva na měnící se provozní podmínky. Vysokotlaké čerpadlo nezávisle na potřebě motoru dodává neustále maximální množství paliva. [2]

1.4.2 REGULACE TLAKU PALIVA NA SACÍ STRANĚ

Ventil dávkování paliva je součástí vysokotlakého palivového čerpadla, zabezpečuje regulaci tlaku paliva ve vysokotlakém zásobníku dle aktuální potřeby. Ventil dávkování paliva reguluje množství přiváděného paliva potřebného k vytvoření vysokého tlaku. Výhodou je, že vysokotlaké palivové čerpadlo vytváří jen takový tlak, který je potřebný pro aktuální provozní režim. To má pozitivní vliv na spotřebu paliva i teplotu paliva tekoucího zpět do palivové nádrže. [2]



Obr. 1 Regulace tlaku paliva [1]

a) ve vysokotlaké části, b) v sací části, c) kombinací
 1- vysokotlaké čerpadlo, 2- ventil regulace tlaku paliva, 3- dávkovací jednotka, 4- tlakový zásobník, 5- omezovač tlaku, 6- snímač tlaku

1.5 VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA

Palivo je vstřikováno přímo do spalovacího prostoru. Palivo pro jednotlivé vstřikovače je dodáváno krátkým palivovým potrubím ze společného zásobníku-railu. Každý vstřikovač je ovládán elektronicky. V závislosti na typu vstřikovače je řídicí jednotkou motoru aktivován elektromagnetický nebo piezoelektrický ventil, který ovládá vstřikovací trysku. Doba otevření vstřikovače a tlak v systému určují množství vstřikovaného paliva [2]. Vstřik paliva je stanoven tak, aby při hoření směsi došlo k tvorbě vyhovujícího množství škodlivin. Současně musí být zachována vysoká účinnost a nízká hlučnost motoru. Díky nezávislosti funkce vstřikovačů na vysokotlakém čerpadle umožňuje systém common rail několik vstřiků během jednoho pracovního cyklu spalovacího motoru. Dnešní vstřikovače umožňují až 10 vstřiků [3].

1.5.1 PILOTNÍ VSTŘIK

Před začátkem hlavního vstřiku je do spalovacího prostoru vstříknuto malé množství paliva. Tímto pilotním vstřikem dojde k pozvolnému nárustu teploty a tlaku ve spalovacím prostoru. Pohonná jednotka má tak nižší hlučnost, měkčí chod (pojem vyjadřující nárůst tlaku ve spalovacím prostoru při pootočení klikové hřídele; $\frac{dp}{d\alpha}$) a dochází k redukci obsahu oxidů dusíku (NO_x). Vstřikování paliva u motorů užitkových aplikací v nezátíženém stavu (například volnoběh) začíná v rozmezí $4^\circ - 12^\circ$ před horní úvratí pístu (TDC). V zatíženém stavu se počátek vstřiku pohybuje v rozmezí od 3° do 6° před horní úvratí pístu do 2° po dosažení horní úvratě. [1]

1.5.2 HLAVNÍ VSTŘIK

Množství vstřikovaného paliva pro hlavní vstřik je řídicí jednotkou přesně vypočítané a odpovídá aktuálnímu zatížení pohonné jednotky. Trvání hlavního vstřiku odpovídá 25° až 36° natočení klikového hřídele. Hodnota vstřikovacího tlaku zůstává během celého procesu téměř konstantní. Jeho spálením dojde k přivedení většiny tepla do pracovního oběhu. [1]

1.5.3 DODATEČNÝ VSTŘIK

Dodatečný vstřik má velice pozitivní vliv na snižování emisí motoru. Rozlišujeme blízký dostřik a vzdálený dostřik. Ihned po hlavním vstřiku následuje blízký dostřik, který ještě probíhá v průběhu spalování hlavní dávky paliva. Dojde k opětovnému zapálení částic sazí. Výsledkem je snížení množství sazí o 20-70 procent. [1]

Při vzdáleném dostřiku nedochází ke spálení paliva. Palivo se odpařuje zbytkovým teplem ve výfukových plynech. Ke vzdálenému dostřiku dochází do 200° od natočení klikové hřídele po TDC. Výsledná směs paliva a plynů je vytlačena výfukovými ventily. Tímto procesem dochází k obohacení výfukových plynů uhlovodíky a následným nárustem teploty výfukových plynů. Zvýšená teplota plynů umožní regeneraci navazujících systémů úpravy výfukových plynů. Nevýhodou je, že vzdálený dostřik může způsobit ředění oleje motorovou naftou. [1]

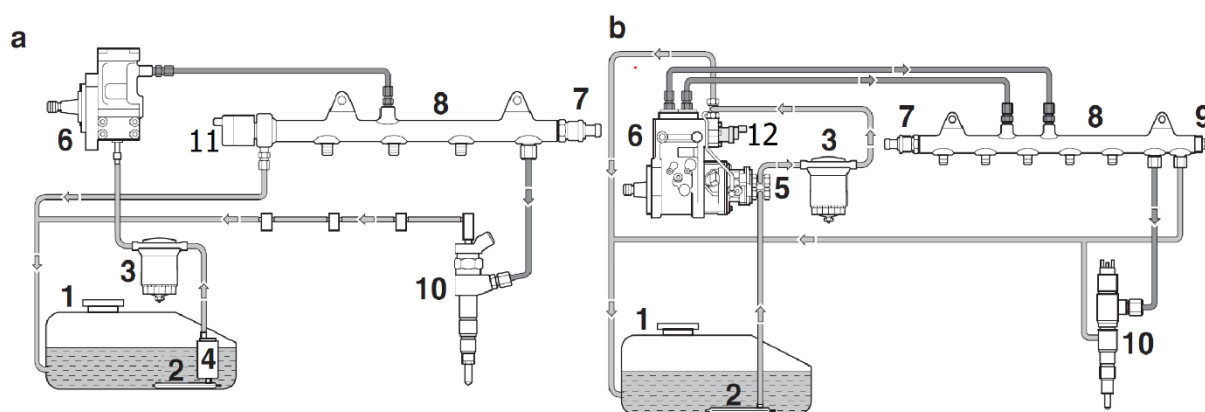
1.6 KONTROLA A ŘÍZENÍ

Řídicí jednotka motoru (ECU) společně s výstupními daty snímačů monitorující aktuální provozní stav vozidla zajišťuje správnou funkci vstřikovací soustavy, projevující se nízkou spotřebou a klidným chodem motoru. Výstupní data obsahují: otáčky motoru, polohu plynového pedálu a klikového hřídele, tlak paliva v railu, teplotu a hmotnost nasávaného vzduchu, teplotu chladicí kapaliny, ...

Základní funkcí řídicí jednotky motoru je zajistit přesné řízení časování vstřiku a množství paliva. Pro kompenzaci tolerancí mezi systémem vstřikování paliva a motorem slouží korekční funkce. Dodatečné řídicí funkce ECU se podílí na snižování emisí výfukových plynů, spotřebě paliva nebo poskytují vyšší bezpečnost a bezpečí. [1]

1.7 SCHÉMA SYSTÉMU COMMON-RAIL

Na níže přiloženém obrázku (Obr. 2) je schematicky vyobrazeno rozložení komponent systému vstřikování s tlakovým zásobníkem. Část „a“ vyobrazuje palivový systém využívající vysokotlaké radiální čerpadlo spolu s ventilem regulace tlaku paliva umístěným v tlakovém zásobníku. Systém vstřikování vyobrazený v části „b“ je typický pro těžká užitková vozidla. Řadové dvoupístové čerpadlo zajišťuje tvorbu tlaku paliva. Výsledný tlak paliva v zásobníku řídí dávkovací jednotka, jež je součástí vysokotlakého čerpadla. Oba systému sdružuje stejně koncipovaný systém vedení zpětného toku paliva i filtrace paliva, kde palivový filtr se nachází mezi vysokotlakým a podávacím čerpadlem.



Obr. 2 Schéma systému vstřikování s tlakovým zásobníkem [2]

1- palivová nádrž, 2- předfiltr, 3- hlavní palivový filtr, 4- elektrické podávací čerpadlo,
5- zubové podávací čerpadlo, 6- vysokotlaké čerpadlo radiální (část a), řadové, 7- snímač
tlaku paliva, 8- vysokotlaký zásobník, 9- omezovač tlaku, 10- vstřikovač, 11- ventil regulace
tlaku paliva, 12- dávkovací jednotka

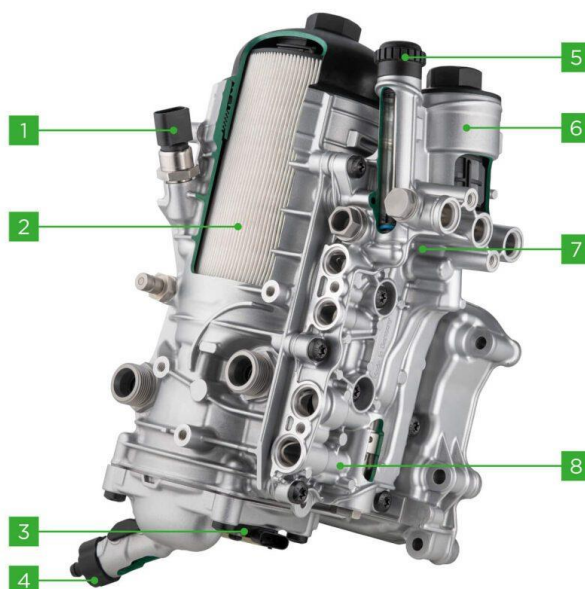
2 NÍZKOTLAKÁ ČÁST

Funkcí komponent nízkotlaké části vstřikování s tlakovým zásobníkem je ukládat, filtrovat a dodávat palivo pro vysokotlaké palivové čerpadlo. Dodávka paliva musí být zajištěna při specifickém vstupním tlaku za všech provozních podmínek. Hlavní komponenty nízkotlaké části jsou: palivová nádrž, podávací čerpadlo, palivový filtr, palivové potrubí.

2.1 PALIVOVÝ FILTR

U spalovacích motorů je nezbytné zajistit filtraci paliva ať už pro bezporuchový provoz všech palivových částí, tak i pro správné spalování. Ve srovnání se zážehovým motorem vyžaduje vznětový motor daleko vyšší nároky na filtraci. Důvodem jsou mnohem vyšší vstřikovací tlaky a vyšší kontaminace nafty [2]. Nečistoty se do systému dostávají nejčastěji při tankování paliva nebo skrze odvětrávání palivové nádrže. Funkcí palivového filtru je zachytávat nečistoty, tím chránit palivový systém.

Hlavní části každého palivového filtru je filtrační vložka, která je umístěna buď ve vlastním kovovém pouzdře (tzv. Spin-on), nebo je integrována do pouzdra v konstrukci palivového vedení (tzv. Cartridge, viz Obr. 3). Pouzdra jsou nejčastěji plastová, hliníková nebo plechová. Důležitou roli při návrhu palivové filtrační soustavy hraje snadná vyměnitelnost samotného filtru. Filtrační vložka je vyrobena ze speciálního papíru na bázi syntetických vláken a netkaných textilií z několika vrstev. Současně použitý materiál musí být hydrofobní, kvůli odlučování vody z nafty. Separace vody probíhá koalescencí na filtračním médiu. Oddělená voda se shromažďuje na dně pouzdra. [13]



Obr. 3 Palivový filtr pro užitková vozidla [14]

1- Senzor tlaku, 2- hlavní filtr, 3- Snímač hladiny vody, 4- výpustní šroub vody, 5 ruční pumpička pro odvzdušnění, 6- hrubý filtr, 7- recirkulační ventil, 8- přetlakový ventil

Nejen že motorová nafta je více znečištěna než benzín, navíc obsahuje parafíny. Parafíny obsažené v naftě způsobují její tuhnutí při nízkých teplotách. Z těchto důvodů jsou moderní palivové filtry vybaveny funkcí předehřevu paliva. Ohřev paliva může být řízen elektricky pomocí topného tělesa nebo zpětným tokem ohřátého paliva z vysokotlaké části systému vstřikování. Další doplňkové funkce jsou indikace údržby pomocí měření diferenčního tlaku, zařízení usnadňující odvzdušnění, obdobně jak je uvedeno na obrázku Obr. 3 (pomocí ruční pumpičky) a zařízení pro automatické vypouštění vody ze systému. [13]

Aby filtr mohl plnit svou funkci, nesmí být zanesený ani poškozený, z těchto důvodů jsou výrobci předepisovány pravidelné výměny. Zejména v užitkových aplikacích jako je například kamionová doprava jsou použity dva filtry. Nejprve dochází k filtraci v hrubém filtru, následně je palivo přefiltrováno jemným (hlavním) filtrem. U dnešních vozidel sloužících v dálkové dopravě je servisní interval nastaven přibližně na 120000 km [21].

2.2 PODÁVACÍ ČERPADLO

Funkcí podávacího čerpadla je dodávat palivo pro vysokotlaké komponenty. Dodávka adekvátního množství paliva musí být zajištěna v každém provozním stavu vozidla. Při návrhu podávacího čerpadla je brán velký zřetel na spolehlivost a hlučnost provozu čerpadla. Podávací čerpadlo se navrhuje jako bezúdržbové, tedy je počítáno s životností po celou dobu provozu vozidla [2]. U lehkých užitkových vozidel je v mnoha případech využito elektrického čerpadla umístěného v palivové nádrži. Pro těžká užitková vozidla (kamion, autobus, ...) se využívá zubových čerpadel, z důvodu vyšších nároků na průtok čerpadel. Zubová čerpadla jsou přímo součástí vysokotlakých čerpadel a jsou poháněna rozvodem motoru.

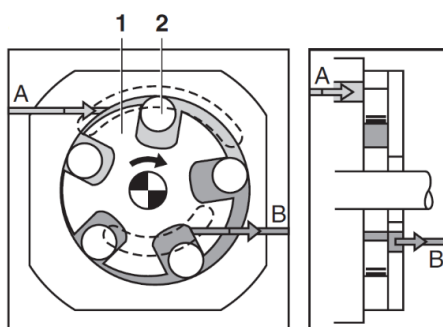
2.2.1 ELEKTRICKÉ PALIVOVÉ ČERPADLO

Elektrické podávací čerpadlo se u vznětových motorů začalo hojně využívat až s příchodem vstřikovacího systému s tlakovým zásobníkem. Mimo hlavní funkci, dodávky paliva, umožňuje v případě nouze přerušit přísun paliva pro vysokotlakou část [2]. Čerpadlo je umístěno v palivové nádrži jako součást palivové jednotky. Základní vlastnost elektrického čerpadla je průtok a maximální dosažitelný tlak. Tyto vlastnosti reflektují vlastnosti použitého vznětového motoru. Obecně platí, že čím výkonnější vznětový motor je, tím výkonnější je elektrické čerpadlo. Průtok čerpadel dosahuje až 300 l/h a maximální dosažitelný tlak až 6,5 baru [2].

Elektrické palivové čerpadlo (viz Obr. 5) lze rozdělit na tři funkční celky:

ČERPADLO

Pro vznětové motory se nejčastěji využívá válečkové čerpadlo [2]. Princip funkce je ukázán na obrázku číslo Obr. 4. Jedná se o objemové čerpadlo, které se skládá z komory, v níž je excentricky uložen drážkový rotor (pozice č.1). V každé drážce rotoru je valivý element (pozice č.2). Na ten působí odstředivá síla od rotujícího statoru společně s tlakem paliva, způsobující vytláčení valivých elementů ven z drážky. Výsledkem je, že válečky působí jako rotující těsnění, čímž dojde k vytvoření komory mezi válečky sousedících drážek. Čerpací účinek je způsoben tím, že po uzavření vstupního otvoru (pozice „A“) se objem kvůli excentrickému uložení statoru neustále zmenšuje. Stlačené palivo opouští čerpadlo výstupním otvorem (pozice „B“). [2]



Obr. 4 Válečkové čerpadlo [2]

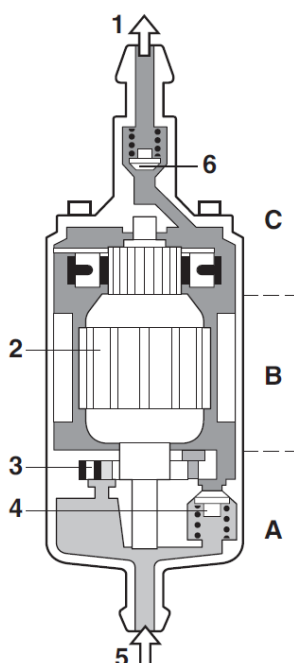
*A-sací část, B-výtlačná část
1- drážkový rotor, 2- valivý element*

ELEKTROMOTOR

Jedná se o stejnosměrný elektromotor. K buzení na statoru dochází pomocí permanentních magnetů. Vinutí kotvy je napájeno přes komutátor. Na komutátor dosedají uhlíkové kartáče. Díky chlazení elektromotoru proudícím palivem dosahuje elektromotor vysokých výkonů.

VÍKO

Součástí víka jsou elektrické přípojky, tlaková přípojka a zpětný ventil. Tlaková přípojka se nachází na výtlačné straně čerpadla. Zpětný ventil zabráňuje vyprázdnění palivového potrubí po vypnutí elektromotoru. Tlak v systému zůstane po určitou dobu po vypnutí zachován.



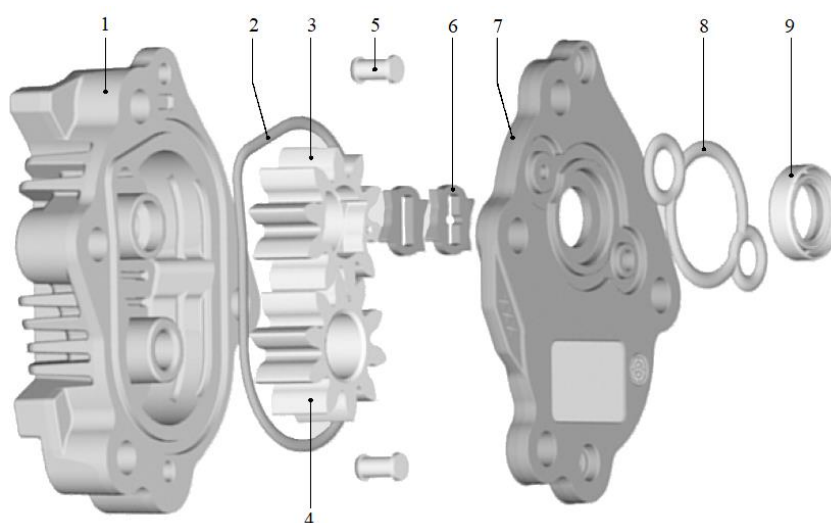
Obr. 5 Elektrické podávací čerpadlo [2]

*A – čerpadlo, B – elektromotor, C – víko
1- výtlačný otvor, 2- rotor elektromotoru, 3- lamelové čerpadlo,
4-omezovač tlaku, 5- sací otvor, 6- zpětný ventil*

2.2.2 ZUBOVÉ ČERPADLO

Zubová čerpadla sloužila k distribuci nafty již u systému vstřikování UIS (sdružená vstřikovací jednotka, UPS (samostatná vstřikovací jednotka). Vyznačuje se vysokou spolehlivostí, dosahuje vyššího tlaku a průtoku než elektrická čerpadla [2]. Přestože zubové čerpadlo je navrženo jako bezúdržbové, v případě nasání vzduchu se musí čerpadlo odvzdušnit.

Hlavními součástmi zubový čerpadel (viz Obr. 6) jsou dvě spolu zabírající, protiběžně se otáčející zubová kola (pozice 3 a 4), která přivádějí palivo do zubových prostor ze sací strany na stranu tlakovou. Styčná linie ozubených kol zajišťuje těsnění mezi sací a tlakovou stranou a zabráňuje zpětnému toku paliva. Dodávané množství paliva je přibližně úměrné otáčkám hnacího kola. [12]



Obr. 6 Zubové čerpadlo [1]

- 1- pouzdro čerpadla, 2- těsnící o-kroužek, 3- hnací ozubené kolo,
4- hnané ozubené kolo, 5- čep, 6- spojka, 7- víko, 8- těsnění,
9- hřídelové těsnění

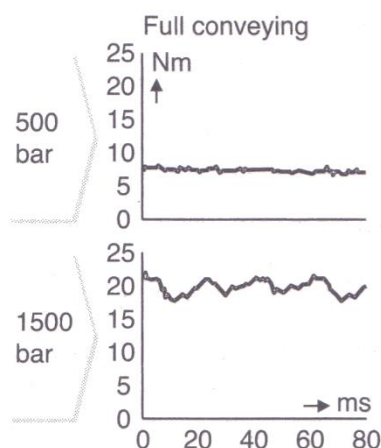
3 VYSOKOTLAKÁ ČÁST

Vysokotlaká část systému vstřikování s tlakovým zásobníkem zastává tři hlavní funkce z celého procesu vstřikování. Vysokotlaké čerpadlo zajišťuje tvorbu tlaku v palivu. K akumulaci stlačeného paliva slouží tlakový zásobník. Vstřikování přesného množství paliva ve správný časový interval zajišťují vstřikovače. Palivo je vstřikováno přímo do spalovacího prostoru, kde dojde ke smíšení se vzduchem a následné expanzi.

3.1 VYSOKOTLAKÉ ČERPADLO

Vysokotlaké čerpadlo se nachází na rozhraní mezi nízkotlakou a vysokotlakou částí systému common rail. Čerpadlo musí zajistit dostatečný přísun paliva za všech provozních podmínek motoru, a to i během startu. Při konstrukci čerpadla je počítáno s bezúdržbovým provozem po celou dobu životnosti. Vysokotlaké čerpadlo vytváří konstantní systémový tlak, který je následně ukládán v tlakovém zásobníku. Palivo při vstřikování dále není stlačováno. Díky rovnoměrnému zatížení čerpadla je výsledný točivý moment o zhruba 81 % nižší než u klasických rotačních čerpadel [1]. Výkon potřebný pro pohon čerpadla se úměrně zvyšuje s tlakem paliva v tlakovém zásobníku a otáčkami čerpadla (viz Obr. 7). [4]

U užitkových aplikací se nejčastěji setkáme s dvou pístovými řadovými čerpadly. Lehká užitková vozidla jsou přednostně vybavena radiálními čerpadly, z důvodu nižší potřeby průtoku paliva. Vysokotlaká čerpadla jsou vždy poháněna motorem prostřednictvím spojky, ozubených kol, řetězu nebo ozubeného řemene [2]. Dále můžeme čerpadla filtrovat dle typu mazání. Rozlišujeme čerpadla mazaná olejem nebo naftou. Pro zajištění správné funkce čerpadel je třeba brát zřetel na předepsanou kvalitu paliva, ale i oleje, pro čerpadla mazána olejem. Při použití výrobcem neschválených kapalin může dojít k poškození čerpadla. Typické závady představují vznik netěsností, případně zadření čerpadla, které vede k úplnému vyřazení z provozu.



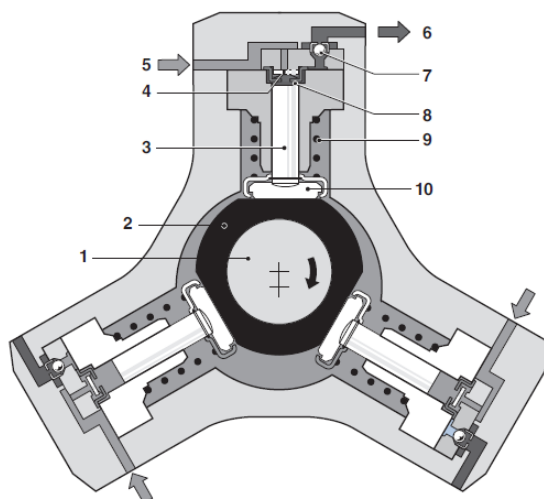
Obr. 7 Závislost zatížení čerpadla na tlaku paliva [4]

3.1.1 RADIÁLNÍ ČERPADLO

RADIÁLNÍ TŘÍPÍSTOVÉ ČERPADLO

Základem čerpadla jsou tři pístové jednotky, které jsou umístěny radiálně vzhledem k hnacímu hřídeli a vůči sobě pootočený o 120° . Hnací hřídel je umístěný centrálně, jehož součástí je výstředník, společně konají rotační pohyb. Výstředník způsobí pohyb jednotlivých pístů. Při pohybu pístu směrem dolů je palivo nasáto skrze sací ventil. Když se píst nachází v dolní úvratí, sací ventil se uzavře. Následně při opačném pohybu pístu (směrem vzhůru) dojde ke stlačení paliva. Poté co tlak paliva ve válci čerpadla dosáhne vyšší hodnoty než tlak paliva v zásobníku, dojde k otevření výstupního ventilu. Píst čerpadla vytlačí palivo do doby, než dosáhne horní úvratě. Zpětný tlak paliva v tlakové liště následně uzavře výstupní ventil. Píst čerpadla se v reakci na sílu pružiny pohybuje směrem dolů. Zbývající palivo ve válci je zbaveno tlaku. Poté co tlak paliva poklesne pod úroveň tlaku v podávacím čerpadle, dojde k otevření sacího ventilu. Celý proces se opakuje. [2]

Průtok paliva čerpadlem je úměrný jeho otáčkám, z toho důvodu se zavádí převodový poměr pro přizpůsobení systému vstřikování paliva pohonné jednotce. Motorizace užitkových vozidel pracují s nízkými otáčkami motoru, proto je nutné volit vyšší převodové poměry. Možné převodové poměry vzhledem ke klikovému hřídeli jsou v rozmezí 1:2 a 5:6. Z důvodu vyšších otáček čerpadla je nutné regulovat přebytečné množství paliva. Využívá se regulace na tlakové straně, častěji však na sací straně (viz kapitola 1.4). Výtláčný zdvih pístů čerpadla způsobuje tlakové pulzace v tlakovém zásobníku. Z důvodu stále přísnějších emisních norem nabývá na významu přesnost vstřikování spojena s minimálním kolísáním vstřikovaného paliva, to umocnilo popularitu radiálních čerpadel s jedním, případně dvěma písty. [2]

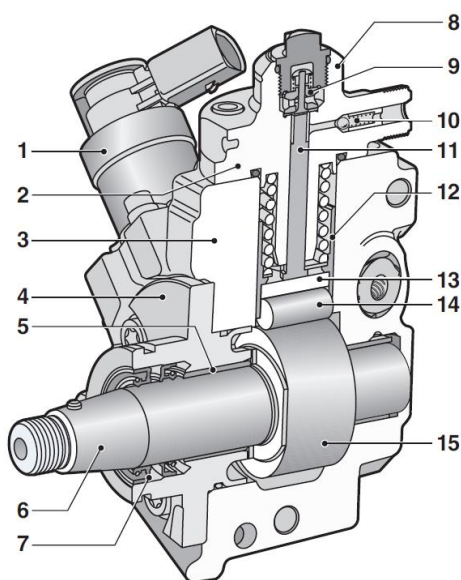


Obr. 8 3pístové vysokotlaké radiální čerpadlo [2]

1-hnací hřídel, 2-výstředníková vačka, 3-píst jednotky čerpadla, 4-sací ventil, 5-přívod paliva, 6-odvod paliva, 7- výtláčný ventil, 8-komora válce, 9-pružina válce, 10-zdvihátko pístu

RADIÁLNÍ JEDNO/DVOUPÍSTOVÉ ČERPADLO

Užitím jedno a dvou pístových radiálních čerpadel bylo umožněno dosáhnout synchronního vstřikování, tj. výtlačný zdvih pístu čerpadla je synchronní se sacím zdvihem pístů motoru. Výtlač čerpadla pro každý válec je tedy vždy pod stejným úhlem klikové hřídele. Z těchto důvodů bylo zapotřebí i upravit převodový poměr čerpadla vůči klikovému hřídeli. Oproti radiálním tří pístovým čerpadlům se využívá převodového poměru 1:1. Dalším zefektivnění čerpadla bylo dosaženo použitím dvojité vačky, která přes zdvihátka pohání píst. Použitím dvojité vačky bylo možno dosáhnout dvou podávacích zdvihů na jednu otáčku čerpadla. Vysoký tlak paliva je generován ve válci, ze kterého je přímo vytlačeno přes zpětný ventil do tlakového zásobníku. Vysoký tlak negativně neovlivňuje pouzdro čerpadla, není tedy potřeba jej vyrábět z odolných materiálů. Přebytečné množství paliva je kontrolováno na sací straně čerpadla pomocí dávkovací jednotky. [2]



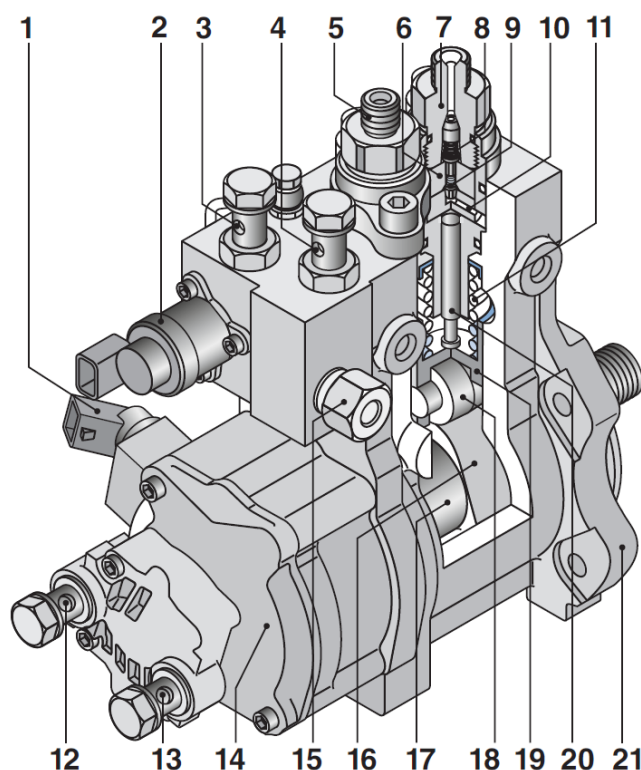
Obr. 9 Radiální jednopístové čerpadlo [2]

1-dávkovací jednotka, 2-válec čerpadla, 3-blok čerpadla,
4-montážní příruba, 5-kluzné ložisko, 6-vstupní hřídel,
7-hřídelové těsnění, 9-sací ventil, 10-vysokotlaký ventil,
11-píst, 12-pružina, 13-, 14-rolna, 15-dvojité vačka

3.1.2 ŘADOVÉ DVOUPÍSTOVÉ ČERPADLO

Řadové dvoupístové čerpadlo se využívá pouze v užitkových vozidlech. Písty čerpadla jsou uspořádány za sebou v axiálním směru vačkového hřídele. Otáčivý pohyb vačkového hřídele je převáděn na translační pohyb pístů čerpadla. Pružina pístu zajišťuje zpětný chod pístu. Sací a výtlačný ventil je společný, nachází se v horní části čerpadla. Součástí většiny řadových čerpadel je i zubové čerpadlo, které je poháněné vačkovým hřídelem. Při pohybu pístu čerpadla směrem dolů dojde k nasátí paliva. V tu chvíli je výtlačný ventil uzavřený silou pružiny. Při

pohybu pístu směrem nahoru dojde k uzavření sacího ventilu a ke stlačení paliva. Tlak paliva působící na pružinu výtláčného ventilu, způsobí jeho otevření. Palivo proudí do vysokotlakého zásobníku. Snímač tlaku paliva umístěný v tlakovém zásobníku spolupracuje s dávkovací jednotkou čerpadla, která dle aktuální potřeby řídí množství paliva potřebného pro stlačení. [2]



Obr. 10 Dvoupístové řadové čerpadlo [2]

- 1- snímač otáček, 2- dávkovací jednotka, 3- přívod paliva (z palivového filtru, 4- odvod paliva (do nádrže), 5- vysokotlaká přípojka, 6- tělo ventilu, 7- držák ventilu, 8- výtláčný otvor ventilu s pružinou, 9- sací otvor ventilu, 10- přívod paliva, 11- pružina pístu, 12- přívod paliva z nádrže, 13- odvod paliva k filtraci, 14- zubové čerpadlo, 15- přepadový ventil, 16- vačka, 17- vačková hřídel, 18- rolna, 20- píst, 21- příruba

3.2 VSTŘIKOVAČ

Palivo je ke vstřikovačům přiváděno z tlakového zásobníku pomocí palivového potrubí. Z pohledu zástavby jsou vstřikovače vhodné pro přímé i šikmé osazení do hlavy válců. Uchycené jsou k hlavě válců pomocí upínacích přílozek. Měděné podložky utěsňují spalovací prostor. Ovládání vstřikovačů zajišťuje řídicí jednotka. Doba vstřiku je řízena snímači polohy klikové a vačkových hřídelů. Způsob vstříknutí paliva rozhoduje o kvalitě spalování, spotřebě a o množství vyprodukovaných emisí. Právě snižování množství emisí nutí výrobce neustále zvyšovat vstřikovací tlak. [4]

Dnešní systémy pracují se vstřikovacím tlakem běžně mezi 180–250 MPa. Extrémní vstřikovací tlak dokládá fakt, že kapalina (nafta) se stává stlačitelnou [15]. Další provozní parametry současných vstřikovačů ukazuje přiložená tabulka Tabulka 1. V užitkových aplikacích se častěji setkáme se vstřikovači ovládanými elektromagneticky, vstřikovače ovládané piezoelektricky jsou používány u lehkých užitkových vozidel.

Tabulka 1 Provozní parametry vstřikovačů [15]

Vstřikovací tlak	180–250 MPa
Otevírací tlak vstřikovací trysky	15–35 MPa
Zdvih jehly vstřikovací jehly	30–250 μm
Doba aktivace vstřikovače	100–1 600 μs
Výrobní tolerance klíčových dílů	0,5–4 μm
Rychlost zdvihu jehly vstřikovací trysky	1–3 m/s
Počet vstřiků na jeden spalovací cyklus	až 9 vstřiků
Počet výstřikových otvorů trysky	5–10 otvorů
Velikost výstřikových otvorů trysky	98–400 μm
Průměr rozstříknutých kapek paliva	9–30 μm
Velikost aktivačního proudu solenoidu	20–27 A
Velikost přídržného proudu solenoidu	6–13 A
Napětí piezoelektrických vstřikovačů	110–160 V;

3.2.1 ELEKTROMAGNETICKÝ VSTŘIKOVAČ

Vstřikovač ovládaný elektromagneticky se skládá ze tří hlavních celků: vstřikovací tryska, hydraulický ovládací systém, elektromagnetický ventil. V návaznosti na [2] je vhodné funkci vstřikovače lze rozdělit do čtyř provozních stavů (uzavřený, otevírá se, otevřený, uzavírá se). Na základě rovnováhy sil působících na součásti vstřikovače rozlišujeme, o jaký provozní stav se jedná. Jednotlivé provozní stavy rozdělují palivo do jednotlivých konstrukčních dílů vstřikovače. Palivo proudí do vstřikovače skrze vysokotlakou přípojku, odtud směřuje do ovládacího prostoru přes škrťací trysku až k jehle trysky. Odvod paliva z ovládacího prostoru řídí kuličkový ventil. Jehlu trysky tlačí do sedla pružina současně s tlakem paliva v ovládacím prostoru.

TRYSKA UZAVŘENA

Pokud je tryska uzavřena, tj. vstřikovač je v klidové poloze, není na elektromagnetický ventil přivedený proud. Pružina elektromagnetu tedy působí na kotvu, čímž zastaví odvod paliva z ovládací komory. V ovládací komoře začne stoupat tlak. Tlak paliva v ovládací komoře dosáhne stejné hodnoty jako v tlakovém zásobníku. Síla od pružiny působící na trysku společně se silou stlačeného paliva tlačí trysku do jejího sedla a nedochází ke vstřikování paliva. [2]

TRYSKA SE OTEVÍRÁ

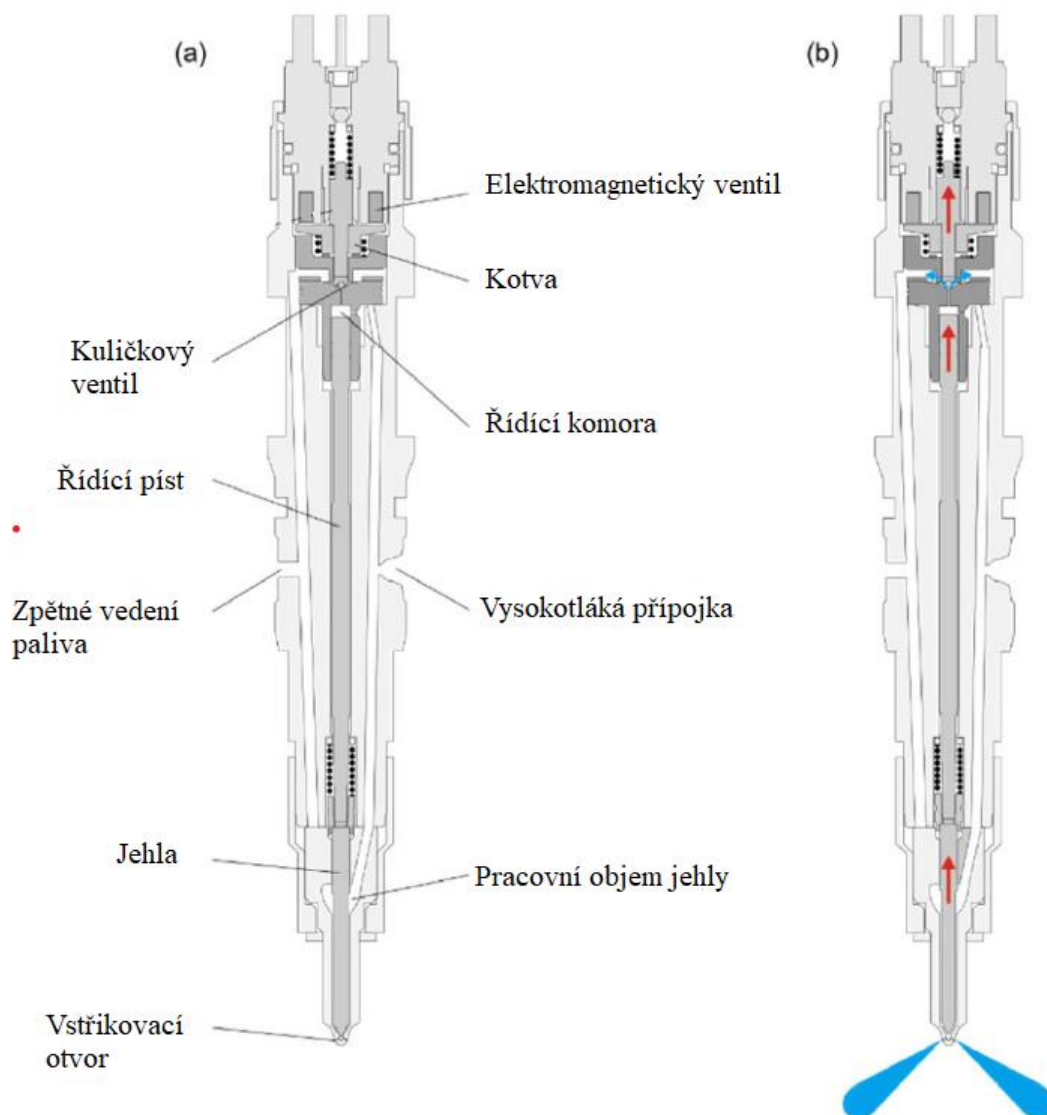
V počáteční fázi vstřikování paliva se přivede proud na elektromagnetický ventil. Síla elektromagnetu přitáhne kotvu s kuličkovým ventilem, čímž se otevře škrťací tryska na odvodní straně. Počáteční proud (cca 20 A) po přitažení kotvy poklesne na tzv. udržovací proud o velikosti přibližně 12 A. Z důvodu užší škrťací trysky na přívodu, než na odvodu paliva dochází k poklesu tlaku paliva v ovládací komoře. [2]

TRYSKA JE OTEVŘENÁ

Vstřikovač je naplno otevřený, jakmile řídicí píst dosáhne své horní polohy. Maximální zdvih pístu je omezen proudícím palivem, jedná se o tzv. hydraulický doraz. Palivo je do spalovacího prostoru vstřikováno pod tlakem blízký se tlaku v palivové liště. Vstřikované množství paliva je úměrné době, po kterou je elektromagnetický ventil otevřen. [2]

TRYSKA SE UZAVÍRÁ

Konec vstřikování začne přerušením dodávky elektrického proudu do elektromagnetického ventilu. Síla pružiny dotlačí kuličkový ventil s kotvou do sedla, čímž dojde k zastavení odvodu paliva a ke zvýšení tlaku v ovládací komoře. Tlak paliva v ovládací komoře a síla pružiny působící na trysku způsobí její uzavření. [2]



Obr. 11 Elektromagnetický vstříkovač Bosch CRIN 3 [7]

3.2.2 PIEZOELEKTRICKÝ VSTŘIKOVAČ

V návaznosti na publikaci [6] je vhodné piezoelektrický vstříkovač (viz Obr. 12) rozdělit do několika funkčních celků:

- Modul akčního členu (piezoelektrický člen)
- Hydraulický převodník
- Servoventil
- Modul trysky

Přímé odezvy trysky vstřikovače na činnost piezoelektrického členu je dosaženo připojením servoventilu k těsné blízkosti trysky. Časová prodleva mezi elektrickým vybuzením piezoelektrického členu a hydraulickou odezvou trysky je přibližně 150 μ s [2].

PIEZOELEKTRICKÝ ČLEN

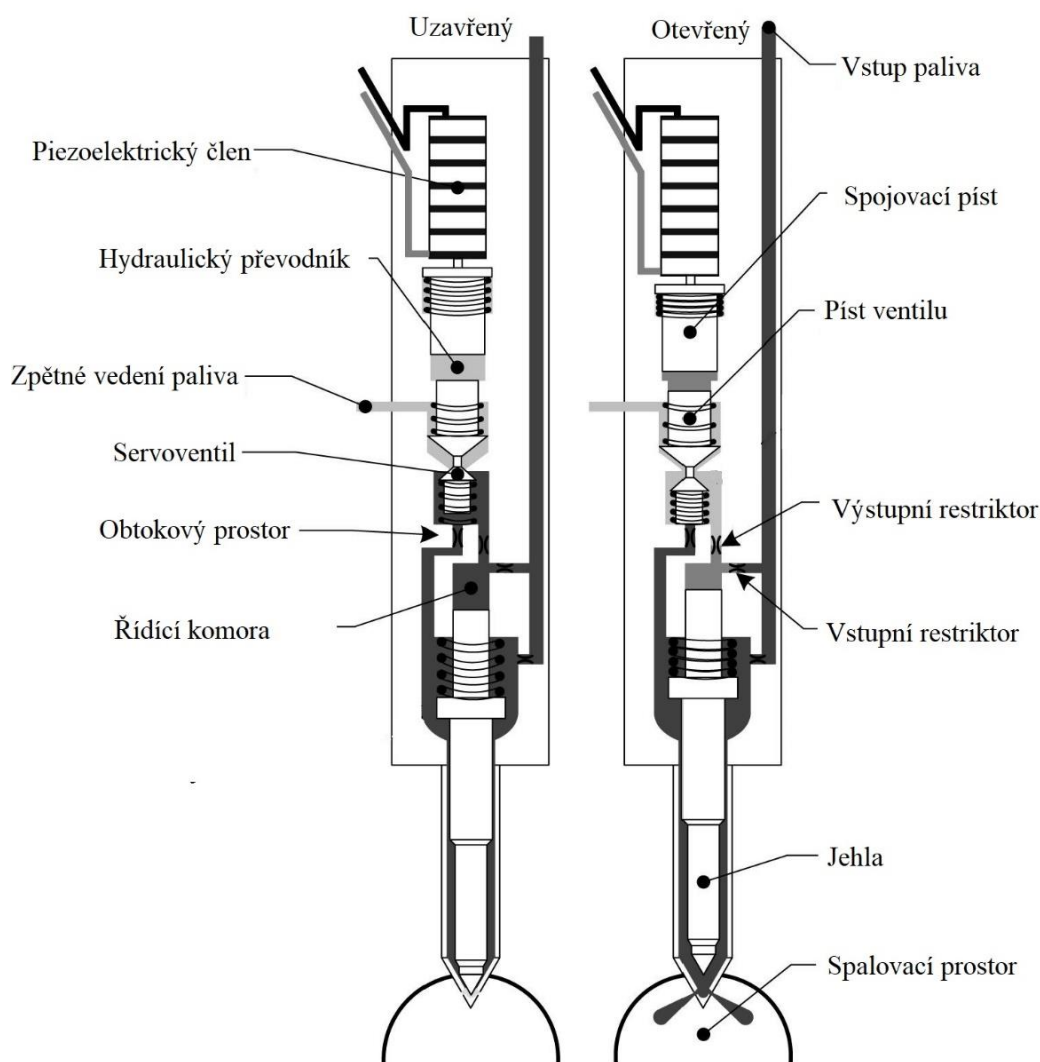
Piezoelektrický člen je složen z několika stovek (300-400) velmi tenkých keramických folií, tak aby utvářely válec. Když je na akční člen přivedeno vstupní napětí (110-160 V), elektrické pole napříč keramickými vrstvami indukuje mechanické namáhání, které má za následek prodloužení každé z keramických folií. Výsledné prodloužení celého piezoelektrického členu se pohybuje v rozmezí 40-50 μ m [2]. Pro plné otevření trysky je zapotřebí použít hydraulického převodníku. [6]

HYDRAULICKÝ PŘEVODNÍK

Hydraulický převodník zvyšuje zdvih piezoelektrického členu na úroveň potřebnou na straně servoventilu a zajišťuje kompenzaci délkových tolerancí ocelových a keramických součástí mezi akčním členem a servoventilem. (např. způsobenou rozdílnou teplotní roztažností keramiky a oceli). Hydraulický převodník se skládá ze dvou pístků rozdílných průměrů vzájemně svázaných proudícím palivem. Pokud není na akční člen přivedeno napětí, je tlak paliva v hydraulickém převodníku roven okolnímu tlaku. Po přiložení napětí na akční člen dojde k nárůstu tlaku v hydraulickém převodníku a následnému působení spínací síly na servoventil. Probíhá vstřikování paliva. [6]

SERVOVENTIL

Jehla trysky je nepřímě ovládaná servoventilem. Pokud není na akční člen přivedeno napětí, servoventil je uzavřený, tj, vysokotlaká část je oddělena od nízkotlaké. Tlak paliva v tlakovém zásobníku udržuje trysku v uzavřené poloze. Přivedením napětí na akční člen dojde k otevření servoventilu a současným uzavřením obtoku. Poměr průtoků mezi výstupním a vstupním restriktorem sníží tlak v řídicí komoře a jehla trysky se otevře. Řídicí množství paliva proudí skrze servoventil do nízkotlakého okruhu vstřikování. Pro ukončení vstřikování dojde k odpojení napětí na akčním členu, čímž dojde k uzavření servoventilu a otevření obtokového prostoru. Následně je řídicí komora naplněna palivem o tlaku shodném ve vysokotlakém zásobníku. [6]



Obr. 12 Piezoelektrický vstřikovač [10]

3.3 VYSOKOTLAKÝ ZÁSOBNÍK A POTRUBÍ

Vysokotlaký zásobník (viz Obr. 13) mimo uchovávání paliva dodané čerpadlem dodává vstřikovačům potřebné množství paliva za všech provozních podmínek motoru. Zásobník je zkonstruován tak, aby jej bylo možné rychle natlačit palivem na požadovaný tlak a zároveň aby docházelo k útlumu tlakových pulzací způsobené vstřikováním. V návaznosti na tyto požadavky je potřeba volit odpovídající délku a průměr potrubí mezi vysokotlakým zásobníkem a vstřikovači. Cílem takové konstrukce je, aby při každém vstřiku byl pro každý válec ve stejnou dobu provozu motoru tentýž tlak. Případný tlakový rozptyl mezi jednotlivými vstřikovači může způsobit problémy s emisemi a jízdní dynamikou vozidla. [16]

Tlakový zásobník je buď kovaný, nebo svařovaný z tažené oceli. Zvláštní pozornost je třeba věnovat únavové pevnosti svařovaných spojů. Nemělo by docházet k pnutí v místech svarů. Pro zvýšení životnosti tlakového zásobníku se využívá autofretáže, vysvětlena v publikaci [27]. Autofretáží dojde k plastické deformaci vnitřní strany stěny zásobníku, což má za následek

vznik tlakových napětí na vnitřní straně stěny a tahových na vnější straně stěny. Tlakové napětí zpomalí růst trhlin, nebo jim dokonce zamezí.

V závislosti na konfiguraci systému vstřikování paliva je tlakový zásobník osazen ventilem regulace tlaku paliva, případně omezovačem tlaku (pozice 3). Snímač tlaku paliva (pozice 1) je vždy osazen.



Obr. 13 Vysokotlaký zásobník Bosch HRFN18 [16]

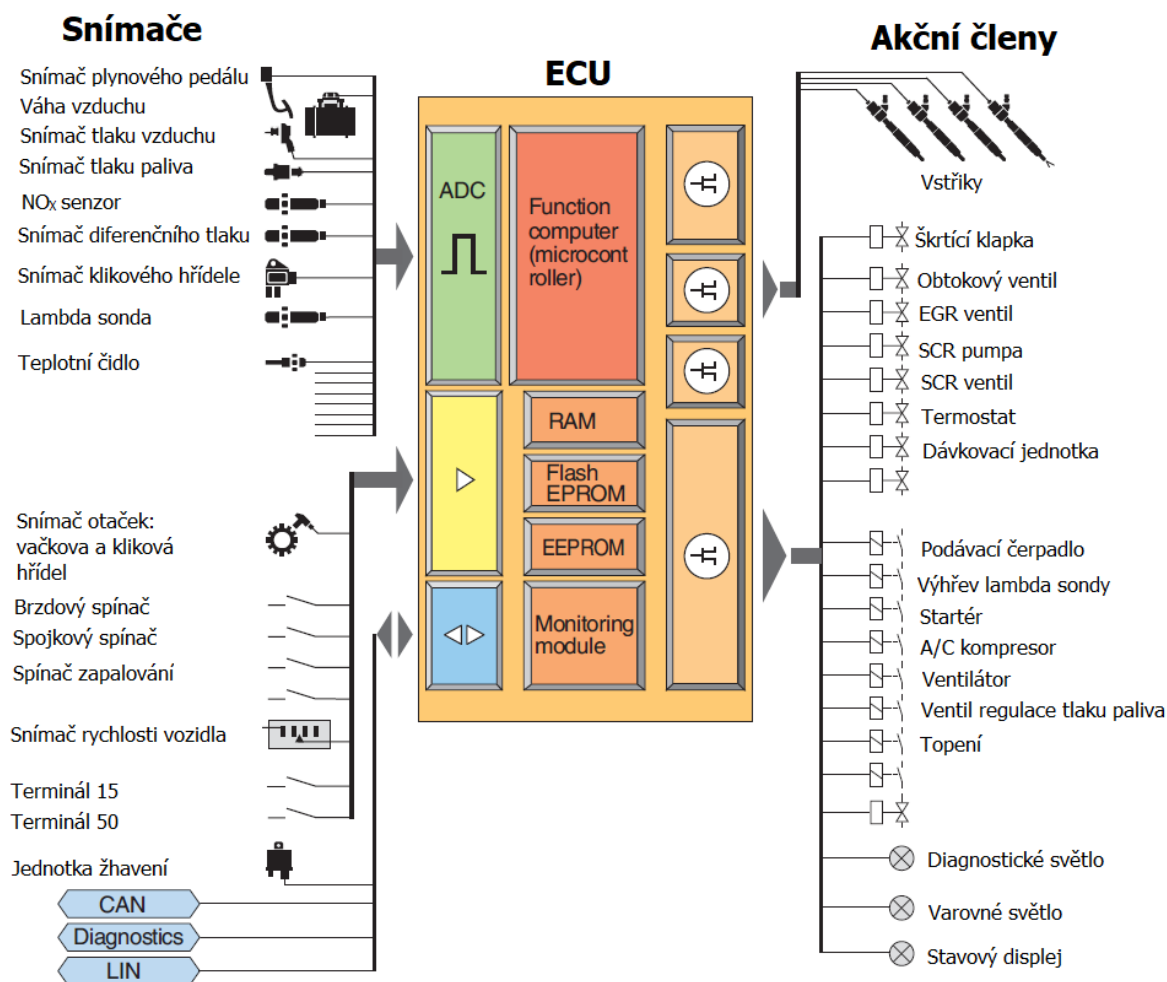
1- snímač tlaku paliva, 2- připojení palivového potrubí, 3- omezovač tlaku

4 ELEKTRONICKÉ ŘÍZENÍ VZNĚTOVÝCH MOTORŮ

Moderní systémy řízení motorů dnes splňují více než jen zákonné požadavky na emise výfukových plynů a spotřebu paliva, zvyšují také jízdní komfort. Tím se úkoly řízení motoru rozšiřují daleko více za rámec řízení vstřikování a zapalování.

Moderní vozidla mají mnoho řídicích jednotek, které jsou vzájemně propojeny komunikačními sběrnicemi (obvykle CAN). Řízení motoru je integrováno do architektury celkového systému vozidla, to znamená, že při řízení vznětového motoru jsou zohledněna data z jiných elektronických systémů, jako je např. protiblokovací brzdový systém (ABS), řízení převodovky nebo řízení jízdní dynamiky. Všechny ovlivňující proměnné mají vliv na množství vstřikovaného paliva a na začátek vstřikování. [2]

Celý systém elektronického řízení diesellových motorů (EDC) se sestává ze snímačů, akčních členů a řídicí jednotky.



Obr. 14 Systém elektronického řízení [2]

4.1 AKČNÍ ČLENY

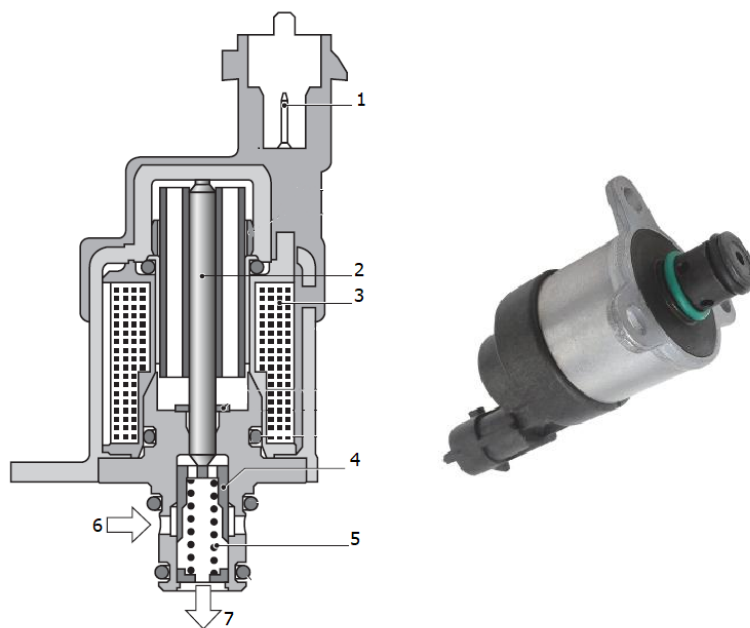
Pomocí akčních členů jsou výstupní elektrické signály z řídicí jednotky převedeny na mechanické.

VSTŘIKOVAČ

Vstřikování přesného množství paliva ve správný časový interval zajišťují vstřikovače. V kapitole 3.2 je detailní popis funkce a ovládaní vstřikovače.

DÁVKOVACÍ JEDNOTKA

Dávkovací jednotka se používá pro regulaci tlaku paliva. Regulace probíhá na sací straně vysokotlakého čerpadla. Podstata samotné regulace tlaku paliva je vysvětlena v kapitole 1.4. Dávkovací jednotka pracuje na principu přepouštěcího ventilu ovládaného elektromagneticky. Píst je držen silou pružiny v otevřené pozici, aby propouštěl palivo. K redukci množství paliva se využívá síla magnetického pole generovaného napájením elektromagnetického ventilu, které působí proti mechanické síle od pružiny. Polohu pístu řídí řídicí jednotka na základě požadovaného výkonu motoru a aktuálního tlaku paliva měřeného snímačem v tlakovém zásobníku. Činnost elektromagnetického ventilu je řízena pomocí dvoustavového signálu, tzv. PWM signálu. [2]

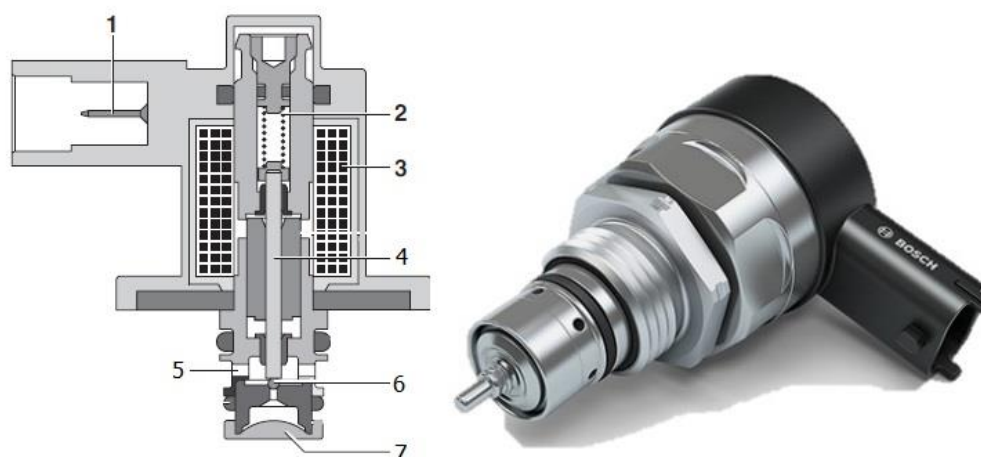


Obr. 15 Dávkovací jednotka (vpravo) [16], řez dávkovací jednotkou [2]

1- elektrická přípojka, 2- ovládací píst, 3- elektromagnet, 4- píst s odměřovacími kanálky,
5- pružina, 6- přívod paliva, 7- odvod paliva

VENTIL REGULACE TLAKU PALIVA

Ventil regulace tlaku paliva zastává stejnojmennou funkci. Na rozdíl od dávkovací jednotky dochází k regulaci tlaku ve vysokotlaké části, viz kapitola 1.4. Ventil regulace tlaku je proporcionální ventil, který je ovládán pomocí PWM signálu. Přivedením elektrického proudu na elektromagnet dojde k uvolnění zatížení od pružiny, nadzvednutí kotvy a uvolnění kuličky ventilu, což změní průtočný průřez. Přebytečné palivo dodávané vysokotlakým čerpadlem je odváděno vypouštěcím otvorem zpět do nízkotlakého okruhu. [2]



Obr. 16 Ventil regulace tlaku paliva (vpravo) [16], řez ventilem [2]

1- elektrická přípojka, 2- pružina ventilu, 3- elektromagnet, 4- kotva, 5- výpust', 6- kulička ventilu, 7- přívod paliva

4.2 SENZORY

Senzory zjišťují fyzikální a chemické veličiny a tím poskytují informace o aktuálním provozním stavu pohonné jednotky. Příkladem úzce souvisejících senzorů se systémem vstřikování jsou:

SNÍMAČ TEPLOTY PALIVA

Vlivem změny teploty paliva dochází ke změně odporu materiálu snímače. Změna odporu je následně převedena na výstupní analogový signál. Zjištěním skutečné teploty paliva je řídicí jednotka schopna dopočítat jeho hustotu. Horké palivo má nižší hustotu než studené. Rozdíl hodnot hustoty ovlivňuje množství vstřikovaného paliva. [4]

LAMBDA SONDA

Pomocí lambda sondy se měří množství kyslíku ve výfukových plynech. Získaná data slouží řídicí jednotce motoru k dosažení co nejlepšího poměru vzduchu a paliva (bohatost směsi) a tím pracovat v nejefektivnějším režimu. Vznětový motor pracuje vždy s přebytkem kyslíku, tedy v režimu chudé směsi ($\lambda > 1$) [4]. Lambda sonda se nachází ve výfukovém potrubí před katalyzátorem.

SNÍMAČ TLAKU PALIVA

Snímač tlaku paliva je součástí tlakového zásobníku. Slouží k regulaci vstřikovaného množství paliva. Tlak paliva deformuje membránu snímače, deformace je zachycena tenzometrickým snímačem. Při vhodné konstrukci je signál úměrný působícímu tlaku. Elektrický obvod zesiluje elektrický signál, který je kompenzován kalibračními údaji pro závislost na tlaku a teplotě. Výstupní analogový signál je zpracován v řídicí jednotce motoru. [4]

SNÍMAČ MNOŽSTVÍ NASÁVANÉHO VZDUCHU

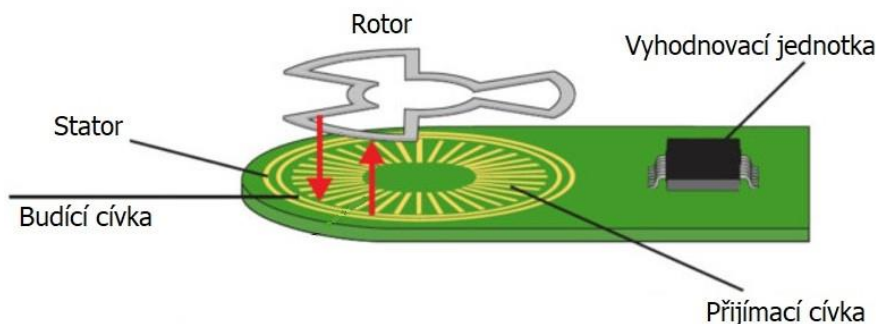
Aby bylo možné určit hmotnostní průtok vzduchu nasávaného motorem, používá se snímač hmotnosti vzduchu (MAS). Pro změření množství nasávaného vzduchu využívá principu ochlazování prouděním. Využívá se tenké vrstvy na destičce, která je vyhřívána elektrickým proudem na teplotu o 150 °C vyšší, než je teplota nasávaného vzduchu [17]. Na topném elementu jsou dva snímače teploty. Při nulovém průtoku vzduchu jsou teploty na obou snímačích stejné, s vyšším prouděním dochází ke stále většímu teplotnímu rozdílu. Rozdíl teplot mezi snímači pak představuje výstupní signál pro řídicí jednotku. [4]

SNÍMAČ OTÁČEK KLIKOVÉHO HŘÍDELE

Snímač polohy klikové hřídele je nezbytný pro řízení vstřikování paliva. Přenáší do řídicí jednotky motoru informace o otáčkách klikové hřídele a úhlové poloze hřídele. Snímač polohy klikové hřídele se skládá ze tří součástí: měřicí hlavy, těla s montážním otvorem a připojovací zásuvky. Nachází se v blízkosti setrvačníku a spolupracuje s impulzátorem. Impulzátor je kovové kolo nejčastěji s obdélníkovými výřezy. Otáčením impulzátoru dochází ke změně magnetického pole, změna magnetického pole následně vyvolá napěťový signál, který je zpracován v ECU. [18]

SNÍMAČ POLOHY PLYNOVÉHO PEDÁLU

Stále častěji se využívá bezkontaktního snímače (viz Obr. 17) založeného na indukčním principu. Tento snímač se skládá ze statoru, který obsahuje budicí cívku, přijímací cívky a elektronickou vyhodnocovací jednotku a rotoru tvořeného jednou nebo více uzavřenými vodivými smyčkami. Přivedené napětí na budicí cívce vytváří magnetické pole, které indukuje napětí v přijímacích cívkách. Ve vodivých smyčkách rotoru se rovněž indukuje proud, který následně ovlivňuje magnetické pole přijímacích cívek. Amplitudy napětí vznikají v závislosti na poloze rotoru vůči přijímacím cívkám ve statoru. Ty se zpracovávají v elektronické vyhodnocovací jednotce a poté se přenášejí do řídicí jednotky motoru. [5]



Obr. 17 Snímač polohy plynového pedálu [5]

4.3 ŘÍDICÍ JEDNOTKA MOTORU

V řídicí jednotce motoru jsou podle definovaných algoritmů zpracovávány signály z jednotlivých snímačů a následně jsou vygenerovány výstupní signály pro akční členy. Moderní řídicí jednotky pracují s řízením točivého momentu. Řidič pomocí plynového pedálu přímo požaduje nastavení točivého momentu. Nezávisle na požadavku řidiče i vnější systémy vozidla (klimatizace, alternátor, ...) vyžadují příslušný točivý moment. Řízením motoru je vypočítán potřebný točivý moment a následně jsou aktivovány akční členy systémů vstřikování a řízení vzduchu. Pro výpočet točivého momentu je klíčový, ale ne dostačující signál snímače plynového pedálu. Ve výsledném průběhu točivého momentu je zohledněn i vliv volnoběhu a systému kontroly trakce. [2]

Mezi další důležité funkce řídicí jednotky patří:

- Řízení otáček: středních, volnoběžných, maximálních
- Tempomat a omezení rychlosti jízdy
- Řízení plnicího tlaku
- Řízení emisních systémů
- Korekce nadmořské výšky a další

5 BUDOUCÍ VÝVOJ

Při zamyšlení se nad budoucím vývojem systému vstřikování s tlakovým zásobníkem s ohledem na zvyšování vstřikovacího tlaku i snižování emisí, je potřeba brát v potaz mimo náklady na výrobu i další neméně důležité faktory. S vyšším vstřikovacím tlakem souvisí vyšší mechanické namáhání všech souvisejících komponent. Množství emisí souvisí zejména s kvalitou rozprášení paliva a jeho smísením se vzduchem při jeho vstřikování do válce.

Výrobci vozidel již řadu let pracují se vstřikovacím tlakem v rozmezí 180–250 MPa. S takto nastaveným tlakem paliva jsou schopni plnit požadavky poslední emisní normy EURO 6. I přes chystající se emisní normu EURO 7 a s ní snižující se limity škodlivin ve výfukových plynech se nepředpokládá navýšení vstřikovacího tlaku. Zvýšení vstřikovacího tlaku vyžaduje navýšení výkonu vysokotlakého čerpadla, použití odolnějších materiálů komponent vystavených vysokému tlaku a zkvalitnění filtrace. To vše přináší zvýšení cen komponent vstřikování. Navýšením vstřikovacího tlaku sice dojde ke zmenšení objemu částice, ale mohlo by se stát, že by byly na tolik malé, že by nedošlo k jejich zachytu ve filtru pevných částic. Přibližně 90 % částic má aerodynamický průměr menší jak 0,2 μm [29], přitom DPF filtr zachytí částice o minimální velikosti 0,1 μm [28].

Kvalitně rozprášené přesné množství paliva ve správný časový okamžik pozitivně ovlivní výsledné emise a celkovou účinnost motoru. Z těchto důvodů nabývá na důležitosti přesnější řízení tlaku paliva. Přesnějšího dávkování paliva, rychlejší odezvy systému vstřikování na měnící se provozní podmínky a menšího zatížení vysokotlakého čerpadla je možno dosáhnout regulací paliva současně jak na tlakové, tak i na sací straně. Pozorujeme nástup radiálních jedno nebo dvoupístových čerpadel na místo radiálních třípístových. Díky těmto čerpadlům je snížena fluktuace tlaku paliva v tlakovém zásobníku, každý ze vstřikovačů tak disponuje palivem pod stejným tlakem. Dochází tak k rovnoměrnějšímu vstřikování paliva. Širším zaváděním elektrických podávacích čerpadel na místo zubových lze dosáhnout rychlejšího přísunu paliva pro vysokotlaká čerpadla, zejména při startech pohonné jednotky [2]. K lepšímu promíchání paliva se vzduchem přispívá i tvar pístu. Tuto strategii využily i automobilky Volvo a Renault, načež vstřikování paliva zajišťují sdružené vstřikovače [11].

Systém vstřikování paliva s tlakovým zásobníkem je dnes na velice vysoké technologické úrovni. Pro splnění stále přísnějších emisních limitů je však potřeba inovovat veškeré celky pohonných jednotek.

6 KONKRÉTNÍ APLIKACE

6.1 SCANIA R590

Vůz Scania R590 byl podroben testovací jízdě v rámci, které proběhlo měření tlaku paliva v tlakovém zásobníku. Měření mělo zejména ověřit maximální deklarovaný tlak paliva výrobcem. Pozornost byla věnována i průběhu tlaku paliva v tlakové zásobníku při měnících se provozních podmínkách. Výstupem je graf dávající do souvislosti otáčky motoru, tlak paliva a čas.

Testované nákladní vozidlo Scania R590 bylo osazeno motorizací DC16 121. Pod tímto kódovým označením se skrývá vznětová pohonná jednotka o zdvihovém objemu 16,4 litrů s osmi válci uspořádanými do V. Testovaná verze disponovala výkonem 434 kW (590 koní) při 1900 min^{-1} a maximálním točivém momentu 3050 Nm, který je dostupný již při 925 min^{-1} . Výrobce nabízí i variantu DC16 123, momentálně se jedná o nejvýkonnější pohonnou jednotku pro nákladní vozidla. Výkon této motorizace činí 566 kW při 1800 min^{-1} . Každá varianta motorizace DC16 splňuje emisní normu Euro 6. Specifikace motorizací vychází z údajů uvedených výrobcem [21]. Námi testovaná verze byla spojena s automatickou převodovkou Opticruise.

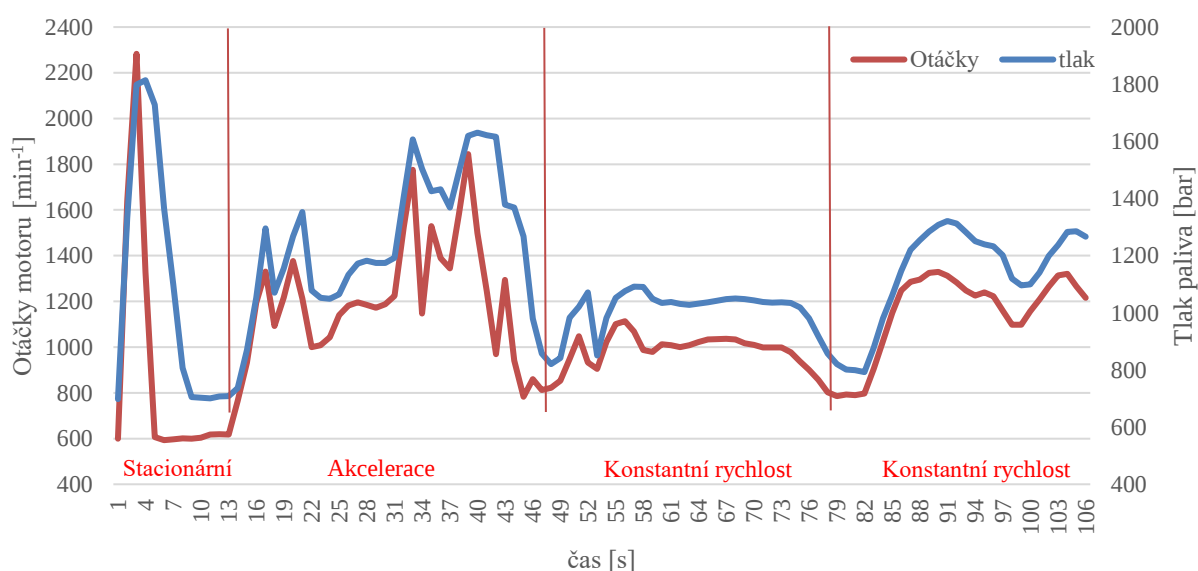
Výrobce využívá vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem označovaný jako Scania XPI, vznikl ve spolupráci s firmou Cummins. Maximální tlak paliva v poslední (testované) verzi motorizace dosahuje 180 MPa. Zajímavostí je, že se výrobce oproti minulé generaci motorů rozhodl snížit tlak paliva o 40 MPa z původních 220 MPa. Další inovací oproti předešlé generaci bylo zavedení optimalizační palivové jednotky (FOU). Jednotka optimalizace paliva zaštiťuje elektrická podávací čerpadla, palivový filtr a snímače. Účelem FOU je zajistit maximální využití paliva z nádrže a tím prodloužit akční rádius. Palivo je tedy nejdříve nasáto z nádrže pomocí dvou elektrických čerpadel. Následně dochází k filtraci paliva. Výrobce vozidla sjednotil servisní interval palivové soustavy s údržbou pohonné jednotky. K výměně palivové filtrační vložky dochází po ujetí 20000–120000 kilometrů, v závislosti na způsobu provozu vozidla. Palivo vtéká do vysokotlaké části pod tlakem 0,4 MPa (viz Obr. 18). Stlačení paliva na výsledný tlak až 180 MPa zajišťuje vysokotlaké čerpadlo Cummins OLP 1 [22]. Jedná se o jednoválcové radiální čerpadlo mazané olejem, regulace tlaku paliva je řízena dávkovací jednotkou umístěnou na vysokotlakém čerpadle. O vstřikování paliva se starají vstřikovače Cummins CRFI 3, tedy elektromagnetické vstřikovače s 10 otvory [22]. Tyto vstřikovače umožňují 6 vstřiků paliva na jeden pracovní cyklus.

Plnicí tlak	0,00	6,00	4,00 bar
Teplota dopravního čerpadla	0,0	100,0	9,0 °C
Referenční hodnota plnicího tlaku	0,00	6,00	4,00 bar
Tlak paliva	0	3 000	700 bar
Tlak paliva, sekundární	0	3 000	700 bar
Teplota paliva	-40,0	140,0	6,0 °C
Maximální povolený požadovaný tlak...	0	3 000	1 800 bar

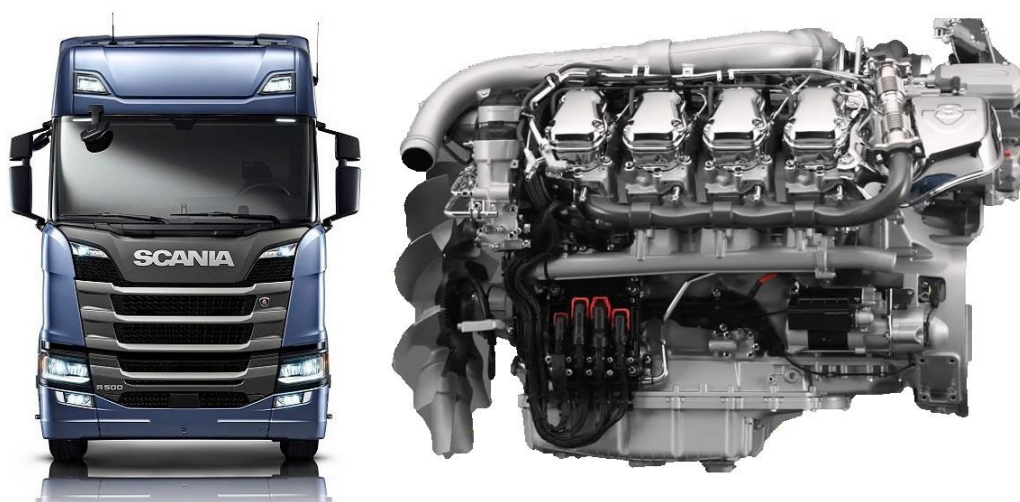
Obr. 18 Tlak paliva podávacího čerpadla (nahore), tlak paliva v tlakovém zásobníku při volnoběžných otáčkách

Na níže přiloženém grafu vidíme průběh tlaku paliva v tlakovém zásobníku. Měření probíhalo při různém zatížení pohonné jednotky. V první části měření bylo vozidlo v klidovém stavu, nepohybovalo se. Měřením byl zjištěný tlak paliva při volnoběžných otáčkách motoru (600 min^{-1}), i navzdory očekávání byl při nulové rychlosti naměřen maximální dosažitelný tlak. Při volnoběžných otáčkách je tlak paliva přesně $0,7 \text{ MPa}$ (viz Obr. 18). Při otáčkách motoru 2283 min^{-1} byl naměřený tlak $179,9 \text{ MPa}$. Druhá část grafu zobrazuje průběh tlaku paliva při akceleraci. Z grafu je patrná závislost tlaku paliva na otáčkách motoru, neméně patrná je i rychlá odezva vstřikovacího systému na změnu otáček motoru, v našem případě způsobených přeražením na vyšší převodový stupeň. Poslední dvě části grafu zobrazují tlak paliva při konstantní rychlosti. Při 1000 min^{-1} si motorizace vystačí s tlakem paliva 100 MPa a při 1300 min^{-1} je tlak paliva 130 MPa . Měření probíhalo na vozidle bez přidané zátěže, za použití originální autodiagnostiky Scania SDP3. Měřením byl ověřen maximální deklarovaný tlak paliva, současně byli ověřeny nabyté teoretické znalosti v praxi.

Tlak paliva v tlakovém zásobníku



Obr. 19 Tlak paliva v tlakovém zásobníku Scania R590



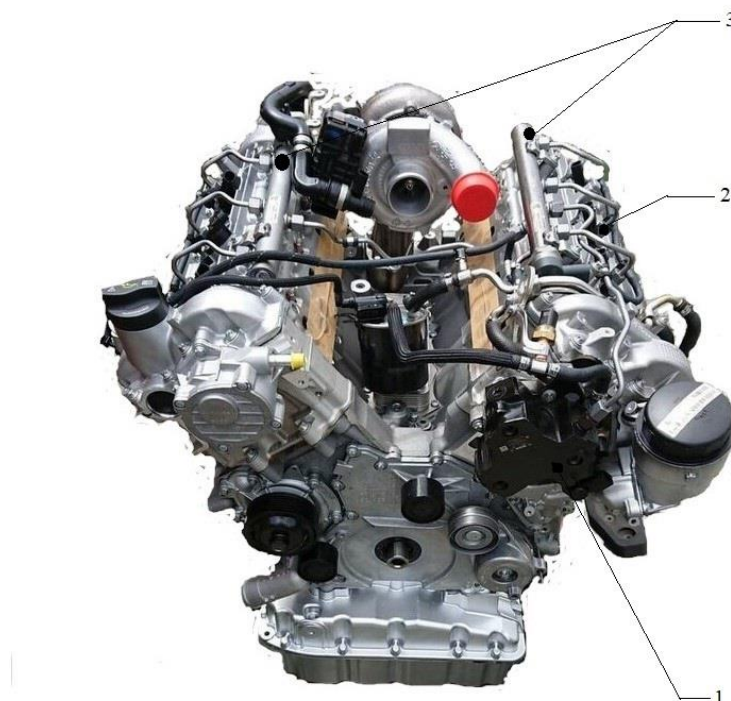
Obr. 20 Scania R590 s motorizací DC16 [21]

6.2 MERCEDES-BENZ SPRINTER

Lehké užitkové vozidlo Mercedes-Benz Sprinter poháněné motorem OM642 (viz Obr. 21) o zdvihovém objemu válců 3,0 litrů a výkonu 140 kW při 4000 min⁻¹ využívá vstřikovací systém výrobce Bosch. Jedná se o moderní pohonnou jednotku splňující emisní normu EURO 6. Pro splnění příslušné emisní normy, mimo systém dodatečného čištění výfukových plynů, napomáhá právě systém vstřikování paliva. Výsledkem jsou kombinované emise CO₂ 394 g/km. [31]

Ve vozidle je použit systém vstřikování Bosch CRS3 [25]. Deklarovaný maximální vstřikovací tlak dosahuje až 270 MPa [25]. Konfigurace systému common-rail odpovídá obrázku Obr. 2a. V palivové nádrži se nachází elektrické čerpadlo dopravující naftu skrze filtr s výhřevem k vysokotlakému čerpadlu. Vysokotlaké čerpadlo je umístěno na přední straně motoru, které je poháněno rozvodovým řetězem. Konkrétně se jedná o čerpadlo Bosch CP3. Jedná se o 3pístové radiální čerpadlo s dávkovacím ventilem umístěným na sací straně. Přisun paliva pro každý válec zajišťuje 6 vstřikovačů CRI3 [25]. Písmeno „I“ v označení vstřikovačů označuje, že se jedná o piezoelektrické vstřikovače. Jelikož se jedná o vidlicový motor, každá hlava válců má svůj tlakový zásobník paliva.

Pravidelnému servisu z řad komponent palivové soustavy podléhá výměna filtrační vložky. Výměna filtrační vložky se provádí vždy po ujetí 120000 km, případně každé 2 roky. Servisní síť Mercedes-Benz pro správu a opravu svých užitkových vozidel využívá autodiagnostiky XENTRY.



Obr. 21 Motor OM642

1- vysokotlaké čerpadlo Bosch CP3, 2- umístění vstřikovače Bosch CRI3, 3- tlakový zásobník

6.3 MAN TGX

Nákladní vozidlo MAN TGX poháněné motorizací D3876 LF01 využívá systému vstřikování s tlakovým zásobníkem od společnosti Bosch. Jedná se agregát o objemu válců 15,2 l s výkonem 471 kW, který je k dispozici v rozmezí 1600-1800 min⁻¹ a maximálním točivým momentem 3000 Nm dostupný od 930 do 1350 min⁻¹. Tato motorizace vyhrála v anketě Diesel roku 2016 pořádanou Italským odborným magazínem DIESEL. Motor splňuje emisní normu EURO 6. [20]

Systém vstřikování Bosch CRSN4 stlačuje palivo až na tlak 250 MPa. Uspořádání komponent odpovídá obrázku Obr. 2b. Palivo je nasávané z nádrže zubovým čerpadle, které je součástí vstřikovacího čerpadla. Před stlačením paliva na 750 kPa dojde k hrubé filtraci paliva v předřadném filtru. Po jemné filtraci je palivo stlačeno na tlak 250 MPa. Jemný palivový filtr je vyhříváný a vybavený systémem pro automatické vypouštění vody. Motorizace D 3876 využívají vstřikovací čerpadlo Bosch CP5.2. Jedná se o dvou pístové řadové čerpadlo mazané naftou. Dávkovací jednotka umístěna na vysokotlakém čerpadle koriguje tlak v závislosti na provozních podmínkách. Samotné vstřikovaná zajišťují vstřikovače CRIN25-L s odděleným vysokotlakým připojením. Tyto vstřikovače jsou schopny až devíti vstřiků během jednoho cyklu. Cely systém vstřikování zaštituje řídicí jednotka Bosch EDC17 CV42. [20]

Stejně jak u lehkých užitkových vozidel, tak i pro těžká nákladní vozidla platí, že systém vstřikování je bezúdržbový. Výjimku má pouze filtrační vložka, kdy výrobce MAN nastavil její výměnu po ujetí 140000 km nebo každých 18 měsíců. Pro pokročilou správu všech komponentů vozidel MAN slouží diagnostický software MAN-cats III.



Obr. 22 Motor MAN D3876 [20]

6.4 DALŠÍ APLIKACE

V příložené tabulce je uveden výběr vozidel různých výrobců používající systém vstřikování s tlakovým zásobníkem. V tabulce jsou zastoupeny jak dodávková (lehká) užitková vozidla, tak i nákladní (těžká) vozidla. Potvrzuje se, že elektromagnetické vstřikovače jsou především užitý v těžkých nákladních vozech, stejně tak řadová vysokotlaká čerpadla. Výrobci vozidel často používají totožný systém vstřikování napříč nabízenými motorizacemi. Zajímavostí je, že výrobci nákladních vozidel Volvo a Renault používají pro konečné stlačení paliva sdružené vstřikovače, kde tlakový zásobník slouží k akumulaci paliva stlačeným podávacím čerpadlem [11]. Vzdáleně tento systém připomíná common rail, z tohoto důvodu nejsou tyto výrobci zařazeni do bližšího přehledu.

Tabulka 2 Přehled vstřikovacích systémů různých výrobců

Vozidlo	Motorizace	Výrobce vstřikování	Čerpadlo	Vstřikovač	Vstřikovací tlak [MPa]
Mercedes Atego [26] [9]	OM936; 7,7 l; 175 kW	Delphi	řadové	elektromagnetický	270
Mercedes Actros [32]	OM471; 12,8 l; 375 kW	Bosch	řadové	elektromagnetický	270
Mercedes Sprinter [31]	OM651; 2,1 l; 120 kW	Delphi	radiální	piezoelektrický	200
MAN TGE [30]	EA288; 2,0 l; 130 kW	Delphi	radiální	piezoelektrický	200
MAN TGS [19]	D1556; 9,0 l; 294 kW	Denso	řadové	elektromagnetický	250
DAF XF [23]	MX-11; 10,8 l; 330kW	Delphi	řadové	elektromagnetický	250
DAF XF [24]	MX-13; 12,9 l; 390 kW	Delphi	řadové	elektromagnetický	250
Renault Master [33]	M9T 702; 2,3 l; 120 kW	Continental	radiální	piezoelektrický	-

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá vstřikovacím systémem s tlakovým zásobníkem používaný v užitkových aplikacích. V rámci zadané problematiky měl být uveden přehled jednotlivých komponent včetně popisu jejich funkce a ovládání. Zamyšlení se nad budoucím vývojem a předvedení řešení systému vstřikování na konkrétních pohonných jednotkách.

Neustále přísnější emisní normy, vyšší požadavky na kultivovanost chodu motoru a nízkou spotřebu paliva umocnily popularitu vstřikovacích systémů s tlakovým zásobníkem. Vznětové jednotky plnící poslední emisní předpisy se zřídka vyskytují s jiným typem vstřikování.

Komponenty nízkotlaké části systému vstřikování, tedy podávací čerpadlo a filtrační soustava zajišťují dostatečný přísun paliva v požadované čistotě pro vysokotlaké komponenty. Nepodílí se tedy přímo na tvorbě směsi paliva a vzduchu. Jejich dopředný vývoj má tedy smysl směřovat k účinnější dopravě paliva z nádrže a ke kvalitnější ochraně vysokotlakých komponent. Již pozorujeme nástup elektrických podávacích čerpadel i u užitkových vozidel, na místo zubových čerpadel. Výsledkem je nižší zatížení pohonné jednotky, rychlejší teplé starty a lepší využitelnost paliva z palivové nádrže. Filtrační soustavy disponují zařízeními pro automatické odvzdušnění případně vypuštění oddělené vody. Tím je zvýšena ochrana vysokotlakých komponent, ale i usnadněna servisovatelnost.

Vysokotlaké komponenty, tedy vysokotlaké čerpadlo, tlakový zásobník a vstřikovače se přímo podílí na tvorbě tlaku paliva a výsledné směsi paliva se vzduchem. Správná funkce komponent zajišťuje kultivovaný chod motoru, nízkou spotřebu paliva a nízké emise. Pro splnění těchto kritérií výrobci vozidel upřednostňují pro své pohonné jednotky radiální jedno nebo dvou pístová čerpadla na místo řadových, případně 3pístových radiálních. Tímto bylo dosaženo synchronního vstřikování, což minimalizovalo tlakové fluktuace paliva v tlakovém zásobníku, současně se zpřesnilo dávkování vstřikovačů. V rámci budoucího vývoje není vhodné zvyšovat vstřikovací tlak nad dnešní hodnotu 200-250 MPa. Další navýšení tlaku by přineslo neúměrné navýšení cen komponent způsobených kvalitnějšími materiály, nižšími výrobními tolerancemi. Smysl vývoje má přesnější a rychlejší řízení toku paliva spolu se zajištěním lepší smísitelnosti směsi, např. vhodnějším tvarováním pístů.

V rámci předvedení řešení systému vstřikování na konkrétní pohonné jednotce, proběhla analýza vozidla Scania R590. Na vozidle proběhla vizuální kontrola uspořádání komponent systému vstřikování, odborná rozprava se školícím technikem i vlastní měření tlaku paliva v tlakovém zásobníku za provozu vozidla. Výsledkem měření byl zobrazen průběh tlaku paliva v závislosti na otáčkách motoru při různém zatížení vozidla (stacionární pozice, akcelerace, konstantní jízda). Měřením byl ověřen maximální deklarovaný tlak paliva výrobcem, současně i nabyté teoretické znalosti. V rámci porovnání systémů vstřikování proběhla analýza dalších vozidel několika výrobců vždy s odborně způsobilou osobou a za použití oficiálně dostupných informací.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] REIF, Konrad. *Diesel engine management: systems and components*. Wiesbaden: Springer, 2014, x, 370 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-3-658-03980-6.
- [2] *Automotive Handbook*. 11th Edition. Karlsruhe: Wiley, 2022. ISBN 9781119911906.
- [3] Piezo injector for common-rail systems. In: *Bosch Mobility* [online]. Gerlingen: Robert Bosch GmbH, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/injectors/piezo-injector-cri3/>
- [4] BASSHUYSEN, Richard Van a Fred SCHAEFER. *Internal Combustion Engine Handbook, 2nd English Edition*. 2016. Dostupné z: doi:10.4271/r-434
- [5] ACCELERATOR PEDAL SENSOR. In: *HELLA TECH WORLD* [online]. Lippstadt: Hella, 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.hella.com/techworld/au/Technical/Sensors-and-actuators/Accelerator-pedal-sensor-3851/>
- [6] CAIKA, V., T. KAMMERDIENER a N. DÖRR. Operation of Piezoelectric Common Rail Injector with Diesel and FT-Kerosene. In: *SAE Technical Papers*. 2007, . Dostupné z: doi:10.4271/2007-24-0070
- [7] HUBER, Benedikt a Heinz ULBRICH. Modeling and experimental validation of the solenoid valve of a common rail diesel injector. In: *SAE Technical Papers*. 2014, . Dostupné z: doi:10.4271/2014-01-0195
- [8] GRAHAM, Mark S., Stephen CROSSLEY, Tony HARCUMBE, Nathan KEELER a Tony WILLIAMS. Beyond euro VI - Development of a next generation fuel injector for commercial vehicles. In: *SAE Technical Papers*. 2014, . Dostupné z: doi:10.4271/2014-01-1435
- [9] MEEK, George A., Ryan WILLIAMS, Dan THORNTON, Patrick KNAPP a Stephen COSSER. F2E - Ultra high pressure distributed pump common rail system. In: *SAE Technical Papers*. 2014, . Dostupné z: doi:10.4271/2014-01-1440
- [10] PLAMONDON, E. a P. SEERS. Development of a simplified dynamic model for a piezoelectric injector using multiple injection strategies with biodiesel/diesel-fuel blends. *Applied Energy*. Elsevier, 2014, **131**, 411-424. Dostupné z: doi:10.1016/J.APENERGY.2014.06.039
- [11] FACT SHEET. In: *VolvoTrucks* [online]. Gothenburg: AB Volvo, 2019 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/D16K650,%20EU6DS_Eng_05_310999633.pdf

- [12] KLESPITZ, József a Levente KOVÁCS. Peristaltic pumps - A review on working and control possibilities. In: *SAMI 2014 - IEEE 12th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Proceedings*. 2014. Dostupné z: doi:10.1109/SAMI.2014.6822404
- [13] Palivový filtr. In: *Autolexicon.net* [online]. Praha: Ing. Jan Sajdl, Ph.D., 2022 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/palivovy-filtr/>
- [14] Main fuel filters. In: *MANN+HUMMEL Group* [online]. Ludwigsburg: MANN+HUMMEL, 2021 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://oem.mann-hummel.com/en/oem-products/fuel-filters/main-fuel-filters.html>
- [15] *Vstřikovače Common rail: šmejdy nebo high-tech produkty?* [online]. Pezinok: AGÁT DIESEL, 2020 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.agat.sk/n/vstrikovace-common-rail-smejdy-nebo-high-tech-produkty>
- [16] High-pressure rail. In: *BOSCH* [online]. Schillerhöhe: Robert Bosch, 2023 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/fuel-supply/high-pressure-rail/>
- [17] Co je u auta váha vzduchu, jak funguje a jaké jsou druhy?. In: *Portál řidiče* [online]. Pardubice: DF SOLUTIONS, 2021 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://www.portalridice.cz/clanek/co-je-vaha-vzduchu-jak-funguje-a-jake-jsou-druhy>
- [18] Příznaky poruchy a oprava snímače polohy klikové hřídele. In: *MotoFocus* [online]. Havířov: MotoFocus EU, 2022 [cit. 2023-04-24]. Dostupné z: <https://motofocus.cz/technika/73169,priznaky-poruchy-a-oprava-snimace-polohy-klikove-hridele>
- [19] MAN D1556 engine. In: *MAN engines* [online]. Munich: MAN Truck & Bus, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.man.eu/engines/en/products/off-road/construction-and-special-machinery/man-motor-d1556.html>
- [20] MAN D3876 engine. In: *MAN engines* [online]. Munich: MAN Truck & Bus, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.man.eu/engines/en/products/off-road/man-d3876.html>
- [21] Specifikace řady V8. In: *Scania* [online]. Chrást'any: Scania Czech Republic, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.scania.com/cz/cs/home/products/trucks/v8/v8-specifications.html>
- [22] COMMON RAIL SYSTEMS. In: *Cummins* [online]. Columbus: Cummins, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.cummins.com/components/electronics-fuel-systems/fuel-systems/common-rail-systems>

- [23] PACCAR MX-11 Engines. In: *DAF Components* [online]. Eindhoven: DAF, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.dafcomponents.com/en/products/paccar-daf-engines/paccar-mx-11-truck-engine>
- [24] PACCAR MX-13 Engines. In: *DAF Components* [online]. Eindhoven: DAF, 2023 [cit. 2023-04-25]. Dostupné z: <https://www.dafcomponents.com/en/products/paccar-daf-engines/paccar-mx-13-truck-engine>
- [25] *Bosch Common Rail Fuel Injection System*. Boschaftermarket, 2019. Dostupné také z: https://www.boschaftermarket.com/xrm/media/images/country_specific/in/services_and_support_1/downloads_10/pdf_5/bosch-fuel-injection-system-catalogue.pdf
- [26] *Delphi-Technologies-Euro6-F2R-Injector-Repair-Launch*. Delphi Technologies, 2022. Dostupné také z: https://www.merlindiesel.com/wp-content/uploads/2022/06/DM1478_Delphi-Technologies-Euro6-F2R-Injector-Repair-Launch_merlogo.pdf
- [27] BLAHA, Jakub. *Výpočtová analýza zbytkových napětí u autofretovaných vysokotlakých zásobníků paliva*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015, 72 listů + 1 CD-ROM. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [28] Filtry pevných částic: Jak vlastně fungují? A regenerují? (1. díl). In: *AUTO.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, 2016 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/filtry-pevnych-castic-jak-vlastne-funguji-a-regeneruji-1-dil-93106>
- [29] *Technologie oprav 1* [online]. První. Nový Jičín: Střední škola technická a zemědělská, NOVÝ JIČÍN, 2016 [cit. 2023-05-21]. ISBN 978-80-88058-23-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/160/Impresum.html>
- [30] MAN TGE. In: *MAN* [online]. Čestlice: MAN Truck & Bus Czech Republic, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.man.eu/cz/cz/dodavka/man-tge/prehled-modelu/prehled-modelu-man-tge.html>
- [31] Technické údaje, rozměry a hmotnost podvozku Sprinter. In: *Mercedes-benz* [online]. Praha: Mercedes-Benz Česká republika, 2023 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.cz/vans/cs/sprinter/cab-chassis/technical-data>
- [32] ACTROS. In: *Mercedes-benz-trucks* [online]. Leinfelden: Daimler Truck, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: https://www.mercedes-benz-trucks.com/cs_CZ/models/actros-long-distance.html
- [33] Renault Master. In: *Business.renault* [online]. Praha: Renault Česká republika, 2023 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://business.renault.cz/uzitkove-vozy/master.html>