



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

SYSTÉM COMMON-RAIL PRO VELKÉ MOTORY

COMMON-RAIL SYSTEM FOR LARGE ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Patrik Dvorák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radim Dundálek, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Patrik Dvorák**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radim Dundálek, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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:

System common–rail pro velké motory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Osvojení základních pojmů zadané problematiky. Zamyšlení nad perspektivou budoucího vývoje vstřikovacích systémů typu common–rail určených pro velké motory s výkonem na válec kolem 130 kW.

Cíle bakalářské práce:

Uvedení přehledu jednotlivých komponentů systému, popis jejich funkce a způsobu ovládání.
Specifické součásti palivového systému – např. zásobník paliva integrovaný ve vysokotlakém čerpadle popř. ve vstřikovači.
Příklady řešení systému u konkrétních pohonných jednotek.

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 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa venuje špecifikám vstrekovacích systémov paliva common-rail pre veľké motory využívané v ťažkom priemysle. Zaoberá sa základnými komponentami systému common-rail ako vstrekovače a vysokotlakové čerpadlá, ich funkcia a rozdelenie do jednotlivých kategórií. Ďalej je pojednávané o špecifických problémoch, ktorým musia čeliť pohonné jednotky tejto výkonovej kategórie ako napríklad vysoké vstrekovacie tlaky a filtrácia paliva. Súčasťou práce sú aj príklady riešenia konkrétnych vstrekovacích systémov pre veľké motory od renomovaných výrobcov. Taktiež je v práci stručne spomenutá téma produkcie škodlivín vo výfukových plynch vznetových motorov.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Common-rail, veľké motory, nafta, vznetový motor, vstrekovač, filtrácia paliva, vysokotlakové čerpadlo, emisie

ABSTRACT

This bachelor's thesis is devoted to specifications of common-rail injection systems for large engines used in heavy industry. Basic components of the common-rail system such as injectors, high pressure fuel pumps their function and their division into individual categories are discussed. Next, specific problems that must be faced by power plants if this power category is discussed, such as high injection pressures and fuel filtration. This thesis also includes examples of solutions for specific injection systems for large engines from renowned manufacturers. The topic of the production of harmful substances in the exhaust gases is also briefly discussed.

KEYWORDS

Common-rail, large engines, diesel, diesel engine, injector, fuel filtration, high pressure pump, emissions

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

DVORÁK, Patrik. *Systém common-rail pro velké motory*. Online, Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2024. Vedúci práce Radim Dundálek. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158028>.

ČESTNÉ VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne pod vedením Ing. Radima Dundálka, Ph.D. a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 23. mája 2024

.....

Patrik Dvorák

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu mojej bakalárskej práce Ing. Radimovi Dundálkovi, Ph.D. za trpezlivosť a ústretovosť počas spracovávania tejto práce. Veľká vďaka patrí aj mojej rodine, ktorá ma počas celého môjho štúdia podporovala a v neposlednom rade chcem poďakovať všetkým pedagógom, ktorí ma sprevádzali týmto štúdiom.

OBSAH

Úvod	10
1 Základné charakteristiky systému common-rail	11
1.1 Nízkotlakový okruh	11
1.2 Vysokotlakový okruh.....	11
1.3 Riadenie systému	12
2 Úvod do problematiky veľkých vznetrových motorov	13
2.1 Tlak v systéme	14
2.2 Filtrácia a kvalita paliva.....	16
2.3 Fluktuácia tlaku vo vysokotlakovej časti systému.....	19
3 Vstrekovače pre veľké motory	24
3.1 Piezoelektrické vstrekovače.....	24
3.2 Solenoidom ovládané vstrekovače.....	24
4 Vysokotlakové čerpadlá pre veľké motory	26
5 Common-rail systémy od spoločnosti Liebherr	27
5.1 Vstrekovače Liebherr.....	27
5.2 Vysokotlakové čerpadlá Liebherr	27
6 Common-rail systémy od spoločnosti Bosch	29
6.1 Vstrekovač CRIN-LE	29
6.2 Palivové čerpadlo Bosch CP9.1-22	30
7 Common-rail systémy od spoločnosti L'Orange.....	31
8 Common-rail systémy od spoločnosti Ganser	32
9 Common-rail systémy od spoločnosti Heinzmann.....	33
10 Aplikácie systémov common-rail v konkrétnych pohonných jednotkách.....	34
10.1 Liebherr D9816	34
10.2 Cummins QSK60	35
10.3 MAN 175D.....	36
10.4 MTU série 4000	37
10.5 GE (General electric) 7FDL V16	38
11 Emisie produkované vznetrovými motormi.....	40
12 Možný budúci vývoj systému common-rail pre veľké motory.....	42
Záver	43
Použité informačné zdroje	44
Zoznam použitých skratiek a symbolov	56

Úvod

Na súčasné vznetové spaľovacie motory sú kladené čoraz vyššie požiadavky týkajúce sa výkonu, spotreby a produkovaných škodlivých emisií. Tieto požiadavky sa netýkajú len osobných a nákladných vozidiel ale aj stavebných strojov, lokomotív, lodí či iných zariadení, ktoré používajú spaľovací motor. V súčasnej dobe tzv. elektrifikácie osobných automobilov by sme nemali zabúdať na to, že nezanedbateľná časť priemyslu sa nezaobíde bez použitia veľkých vznetových motorov. V oblasti spaľovacích motorov majú vznetové motory veľkú výhodu, a to tú, že v porovnaní so zážihovými motormi pracujú s vyššou termickou účinnosťou, a teda sú jasnou voľbou pre aplikácie zamerané na efektívnosť prepravy či výroby. Trend zvyšovania účinnosti sa ale naďalej týka aj vznetových motorov. Je ovplyvnená viacerými faktormi či už samotným palivom, ktoré motor využíva, bohatosťou zmesi paliva a vzduchu alebo kompresným pomerom. V oblasti vznetových motorov sa pracuje s relatívne vysokými kompresnými pomermi, chudobnou zmesou paliva a naftou. Jedným z primárnych aspektov ovplyvňujúcich tieto parametre je príprava paliva a riadenie tohto procesu. Systémy vstrekovania paliva pre vznetové motory prešli desiatkami rokov vývoja a v súčasnej dobe je najrozšírenejší systém common-rail. Vznik systému common-rail napomohol aplikovať vznetové motory do širšej škály motorov čo malo veľký dopad na efektívnosť prepravy osôb a produktov. Tento systém je využívaný vo veľkom množstve druhov strojov a vozidiel vrátane motorov, ktoré dosahujú výkon na jeden valec na úrovni výkonu priemerného osobného vozidla. Tieto motory pracujú s extrémne vysokými vstrekovacími tlakmi. Pre dosiahnutie efektívneho prehorenia zmesi musí byť palivo dokonale atomizované a premiešané s nasávaným vzduchom. V súčasnosti sa v tomto systéme nachádzajú súčiastky, na ktorých výrobu sú používané najmodernejšie technológie či už z hľadiska využívaných výrobných technológií alebo materiálov. Vysoké tlaky paliva v systéme si vyžadujú veľmi presné obrábacie operácie. Materiály používané na kľúčové komponenty musia byť schopné odolať ako mechanickému namáhaniu tak aj teplotným fluktuáciám, pričom musia byť zachované ich charakteristické rozmery. Systém common-rail vyžaduje na svoju funkciu aj pokročilé elektronické systémy, ktoré dokážu promptne reagovať na zmeny vyvolané prevádzkou motora. Toto napovedá, že v oblasti systémov common-rail pre veľké motory je stále priestor na inovácie a ďalšie zefektívňovanie tohto systému.

1 ZÁKLADNÉ CHARAKTERISTIKY SYSTÉMU COMMON-RAIL

Systém common-rail je systém priameho vstrekovania paliva, ktorý sa využíva najmä v piestových vznetových motoroch [1]. Hlavným cieľom je dodanie presného množstva paliva v presne stanovených časových úsekoch. Dôležitou časťou systému je tlakový zásobník paliva, ktorý je spoločný pre všetky vstrekovacie a plynie z neho samotný názov systému. Tento systém nie je priamo závislý na otáčkach či zaťažení motora, čím priniesol do sveta vznetových spaľovacích motorov omnoho väčšiu voľnosť v oblasti ladenia parametrov vstrekovania [2]. Systém pozostáva z troch hlavných častí a to nízkotlakovej, vysokotlakovej a riadiacej časti [3]. Schematické znázornenie systému common-rail môžeme vidieť na obrázku Obr. 1.

1.1 NÍZKOTLAKOVÝ OKRUH

Nízkotlaková časť sa podieľa na doprave a čistení paliva pre vysokotlakovú časť [3]. Pozostáva z palivovej nádrže pomocného palivového čerpadla hrubého palivového filtra (v niektorých aplikáciách odkalovača) a nízkotlakového palivového vedenia, ktoré tieto komponenty spája [4]. Nízkotlaková časť dopravuje palivo z palivovej nádrže cez palivový filter alebo sériu viacerých palivových filtrov pomocou elektrického podávacieho palivového čerpadla. V tejto fáze je z paliva taktiež separovaná voda a v niektorých aplikáciách je palivo tiež vyhrievané [3]. Neoddeliteľnou súčasťou nízkotlakového okruhu je takzvaný prepád paliva, pomocou ktorého sa palivo, ktoré je vypustené pretlakovým ventilom alebo vstrekovacími, orientované späť do palivovej nádrže [5].

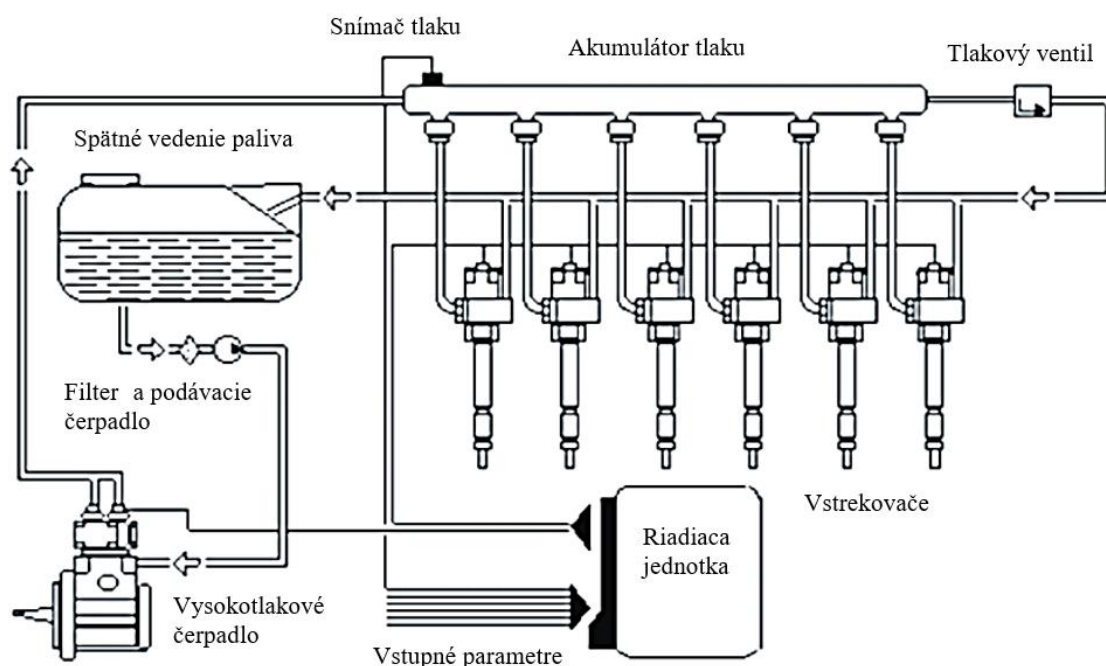
1.2 VYSOKOTLAKOVÝ OKRUH

Vysokotlaková časť systému common-rail pozostáva z generátora tlaku (čerpadlo) akumulátora tlaku (rail) a vstrekováčov [3]. Všetky komponenty sú prepojené vysokotlakovým palivovým vedením.

Vysokotlakové čerpadlo, na rozdiel od nízkotlakového, generuje tlak v stovkách megapascalov [4]. Zohrávajú jednu z najdôležitejších úloh spomedzi všetkých komponentov systému common-rail. Konfigurácia vysokotlakových čerpadiel je v súčasnosti radiálna alebo v prípade väčších motorov radová [3]. Hriadeľ čerpadla je poháňaný z kľukového hriadeľa motora, z ktorého odoberá určité množstvo výkonu [6]. Aby tento kľúčový komponent správne fungoval, musí pracovať s veľmi čistým palivom, nakoľko súčasti čerpadla sú vyrobené s vysokou presnosťou [3].

Ďalším dôležitým prvkom systému common-rail je vlastný zásobník alebo akumulátor tlaku – rail. Akumulátor tlaku plní úlohu medzičlánku medzi vysokotlakovým čerpadlom a vstrekováčom. Pomocou neho je systém schopný pracovať nezávisle na otáčkach motora [3]. Plní tiež funkciu tlmenia fluktuácií tlaku, ktoré vznikajú funkciou vstrekováčov, a tým napomáha udržiavať konštantný vstrekovací tlak [7]. Rail je spoločný akumulátor pre všetky vstrekovacie, čo znamená, že pomocou regulátora tlaku, ktorý je na ňom umiestnený, môžeme kontrolovať a meniť množstvo paliva podľa potreby vo všetkých vstrekováčoch súčasne [4]. Ovládanie tlaku je možné rozdeliť na ovládanie na vysokotlakovej strane okruhu, na nízkotlakovej strane a kombinovane [3].

Vstrekovač je časť vysokotlakového systému, ktorá je zodpovedná za správne dávkovanie paliva do jednotlivých valcov. V súčasnej dobe sa najčastejšie používajú vstrekovače ovládané elektromagneticky (solenoid) alebo piezoelektricky [4]. Existuje množstvo rôznych druhov vstrekovačov či už z pohľadu zástavby do hlavy motora alebo výkonu motora. Dôležitou časťou vstrekovača sú trysky. Trysky determinujú atomizáciu paliva, spôsob horenia zmesi paliva a vzduchu, a teda majú priamy dopad na chod, efektivitu a výkonové parametre motora. [3]. Ovládanie množstva paliva a okamih, kedy je palivo vstreknuté do valca, je riadené elektronicky riadiacou jednotkou motora. Toto dovoľuje vstrekať palivo vo viacerých fázach, čo má za následok zlepšenie výkonu motora, zníženie emisii hluku a škodlivín obsiahnutých vo výfukových plynoch [2; 3].



Obr. 1 Stručná schéma systému common-rail; upravené podľa [8]

1.3 RIADENIE SYSTÉMU

Riadiaca jednotka motora zbiera informácie z rôznych snímačov, ktoré snímajú údaje o motore potrebné k správne fungovaniu palivového systému ako celku. Softvér obsiahnutý v riadiacej jednotke musí prihliadať na optimálny okamih vstrekovania paliva a množstvo vstrekaného paliva [3]. Tieto hodnoty sa neustále menia na základe zaťaženia motora, prostredia v akom motor pracuje a množstva iných parametrov, ktoré spolu súvisia. Medzi hlavné vstupné parametre riadiacej jednotky patrí: poloha vačkového a kľukového hriadeľa, poloha plynového pedálu, teplota nasávaného vzduchu, množstvo nasávaného vzduchu, tlak v palivovom systéme a pri preplňovaných motoroch aj tlak nasávaného vzduchu [3]. Výstupom riadiacej jednotky je signál ovládajúci pretlakový ventil, vstrekovače, EGR ventil a mnoho ďalších. Vďaka elektronicky riadenému vstrekovaniu paliva je motor schopný pracovať efektívnejšie než s konvenčným mechanickým vstrekaním [2]. Je nutné podotknúť, že systém priameho vstrekovania common-rail je plne závislý na elektronickom riadení vstrekovacieho procesu.

2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY VEĽKÝCH VZNETOVÝCH MOTOROV

Veľké vznetové motory sa používajú v rôznych aplikáciách po celom svete. Medzi najvýznamnejšie sektory využívajúce tieto motory patrí lodný, železničný ale aj ťažobný sektor. Veľké vznetové motory nájdeme aj v rôznych elektrocentrálach, kde slúžia na výrobu elektrickej energie pre lokality bez pripojenia ku elektrickej sieti alebo ako núdzové zdroje elektrickej energie napríklad pre jadrové elektrárne. Nutnosť optimalizácie týchto motorov v oblastiach, ktoré budú priblížené v nasledujúcich kapitolách vyplýva z faktu, že tieto pohonné jednotky sú konštruované na fungovanie počas niekoľkých dekád.

S rastúcim výkonom motora ako aj celkovými rozmermi rastú aj nároky na systém dopravy a prípravy paliva. Medzi najvýznamnejšie rozdiely v porovnaní s motormi pre osobné automobily patria: objemový prietok paliva, tlak vo vysokotlakovom systéme, kvalita paliva a jeho druh, prevádzkové podmienky či už teplotné alebo spôsob zaťažovania, prevádzkové intervaly a iné. S rastúcim tlakom v systéme a jeho rozmermi súvisia rôzne fenomény týkajúce sa najmä mechaniky tekutín – konkrétne paliva. Tieto fenomény je nutné brať do úvahy, pretože ovplyvňujú všetky kľúčové parametre týkajúce sa vstrekovania [9]. Ako bolo spomenuté v úvode, hlavné požiadavky kladené na veľké motory sú predovšetkým nízka spotreba paliva teda ekonomickosť a nízka koncentrácia škodlivín vo výfukových plynoch teda ekologickosť [10]. V posledných rokoch sa ukázalo, že systém common-rail je najvhodnejším riešením vstrekovania paliva pre veľké motory vďaka svojej flexibilita [4]. Spoločnosť MTU je priekopníkom v systémoch common-rail pre vysokovýkonné komerčné aplikácie. V článku [10] od spoločnosti MTU je opísaný systém vstrekovania paliva ako jeden z najdôležitejších aspektov ovplyvňujúcich ekonomickosť a ekologickosť motora.

Je možné povedať, že pri návrhu pohonnej jednotky, ktorá má splňať emisné normy a požiadavky na hospodárnosť, je nutné nájsť kompromis medzi tromi faktormi, ktoré sa navzájom ovplyvňujú a to tvorba oxidov dusíka, tvorba pevných častíc a spotreba paliva. Ak optimalizujeme termickú účinnosť motora, teda bude zvyšovaná efektivita prehorenia zmesi (napríklad zvýšením vstrekovacieho tlaku pre dosiahnutie lepšieho prehorenia zmesi) zvýšime tým teplotu s čím je spojená tvorba oxidov dusíka. Na druhú stranu, ak sa zameriame na zníženie tvorby oxidov dusíka, výsledok bude vysoká spotreba paliva a vysoké hodnoty pevných častíc vo výfukových plynoch. [10]

Charakteristickým prvkom systému vstrekovania paliva súčasných vznetových motorov všetkých veľkostí je prítomnosť niekoľkých vstrekov paliva počas jedného cyklu. Ide teda o niekoľko vstrekovacích udalostí, ktoré sa udejú počas kompletného cyklu štvortaktného motora. Dôvodom rozšírenia tejto metódy vstrekovania paliva je výrazné znížovanie škodlivých plynov a pevných častíc obsiahnutých vo výfukových splodinách [11]. V porovnaní s metódou, kedy je objem paliva spotrebovaný počas jedného cyklu vstreknutý v jednej či dvoch dávkach, je zmes paliva a vzduchu najlepšie premiešaná v prípade troch vstrekovacích udalostí počas jedného cyklu [12]. Toto premiešanie pomáha zabrániť vzniku takzvaných studených miest v spaľovacej komore [13]. Stratégia dvoch vstrekov počas jedného cyklu vykazuje zníženie emisii oxidov dusíka a nespálených uhlíkovodíkov, no dochádza ku zvýšeniu emisii pevných častíc [14]. Snaha o zníženie produkovaných škodlivých emisii vedie vývoj veľkých vznetových motorov smerom zvyšovania počtu týchto vstrekov, a preto je veľmi výhodné využívať systém common-rail, ktorý využíva elektronicky riadené vstrekovače dodávajúce tomuto systému značnú flexibilitu v oblasti počtu vstrekov a množstva

vstreknutého paliva. Z tohto dôvodu je mnoho moderných veľkých vznetových motorov vybavených systémom common-rail a dokonca do veľa motorov tohto typu je systém common-rail montovaný dodatočne s cieľom znížiť produkované emisie a zvýšiť účinnosť [15]. Aj keď sa zdá, že systém common-rail je dokonalé riešenie, je s ním spojené množstvo výziev, ktoré je nutné pri jeho návrhu brať do úvahy.

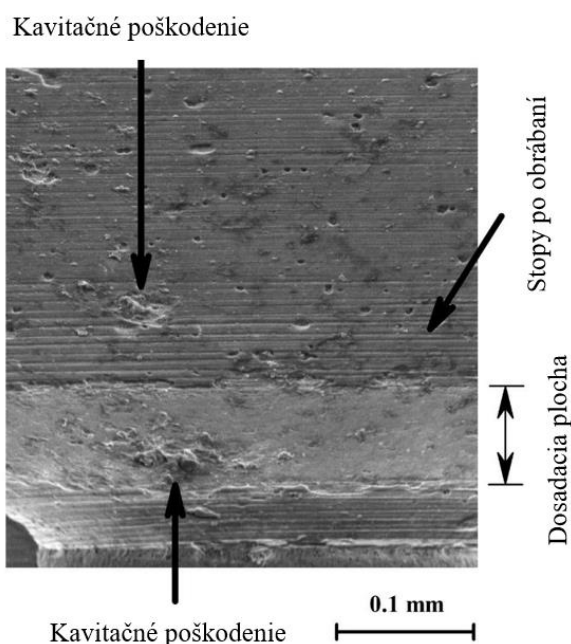
2.1 TLAK V SYSTÉME

Ako bolo spomenuté, zvyšovanie vstrekovacieho tlaku prináša výhody v podobe vyššej efektivity, a teda schopnosť využiť viac energie z rovnakého objemu paliva. Avšak zvyšovanie tlaku v systéme má svoje obmedzenia. V prípade vznetových motorov je systém prípravy paliva obzvlášť dôležitá téma. Na rozdiel od zážihových motorov je horenie zmesi paliva a vzduchu iniciované samovznietením, bez asistencie systému zapalovania. Kvôli tomuto je nutné zabezpečiť presnú distribúciu paliva v spaľovacej komore. Medzi základné pravidlá, ktoré je nutné dodržať pri samovznietení paliva v moderných motoroch, patrí dostatočný tlak paliva na prekonanie tlaku stlačeného vzduchu v spaľovacej komore, rýchla odpoveď systému z hľadiska dodávky paliva a efektívna atomizácia [16]. Toto všetko je možné zaistiť dostatočne vysokým tlakom. Vznetové motory pracujú s heterogénnou zmesou paliva a vzduchu, čo má za následok vznik chladných oblastí v spaľovacej komore, čo má nepriaznivý účinok v podobe nedokonalého spaľovania [13]. Tomuto javu je možné zabrániť okrem už spomenutej metódy rozdelenia množstva paliva aj zvyšovaním vstrekovacieho tlaku paliva [17]. V motore s priamym vstrekom sa palivo vstrekuje priamo do valca pomocou vstrekovacej trysky pod určitým tlakom. Cieľom zvyšovania tohto tlaku je okrem iného zlepšenie atomizácie paliva teda zmenšenie kvapiek paliva, zvýšenie schopnosti palivového prúdu penetrovať vzduch v spaľovacej komore, a teda zlepšiť jeho premiešanie so vzduchom [17]. Je teda možné povedať, že zvyšovanie vstrekovacieho tlaku napomáha lepšiemu premiešaniu paliva a vzduchu, čo vo výsledku vedie k lepšiemu prehoreniu zmesi, vyššej efektivite spaľovania a zvýšeniu výkonu pohonnej jednotky. V prípade veľkých motorov ide o tlaky, ktoré sú podobné ako tlaky v motoroch pre osobné vozidlá, no v niektorých prípadoch môžu byť tieto hodnoty vyššie. Pri zvyšovaní vstrekovacieho tlaku do extrémnych hodnôt však môžu nastať aj určité komplikácie. Medzi tieto komplikácie patria najmä spomalenie reakcie vstrekovacích ventilov v prípade ich zatvárania, zvýšený statický únik a kavitácia [18].

Spoločnosť Denso, ktorá má v súčasnosti ambície zvyšovať vstrekovací tlak až na hodnoty 300 MPa, poukazuje aj na možné problémy, ktoré vznikajú vplyvom vysokého tlaku. Medzi hlavné javy, ktoré majú na svedomí kontraproduktívnosť zvyšovania tlaku v systéme je statický únik paliva [19]. Je možné povedať, že v prípade statického úniku figurujú tri premenné, ktoré sa vzájomne ovplyvňujú. Zvyšovanie vstrekovacieho tlaku vedie k zvýšeniu teploty, toto zvýšenie teploty následne spôsobuje zväčšenie vôlí, pokles viskozity paliva a následné zvýšenie statického úniku [19]. Medzi oblasti záujmu by podľa autorov tejto štúdie malo patriť zvyšovanie teploty paliva. Teplota paliva prirodzene rastie s tlakom a mala by byť držaná na čo najnižších hodnotách, pretože jej nadmerné zvyšovanie spôsobuje zmenu viskozity, hustoty a môže spôsobovať takzvané starnutie paliva a tvorbu depozitov na kľúčových komponentoch. Spoločnosť Ganser-Hydromag AG už v roku 2000 vo svojom článku [20] upozorňovala na možné úskalía, ktoré môžu nastať pri zvyšovaní tlaku vo vysokotlakovej časti systému common-rail. Medzi najzjavnejšie problémy radia úniky medzi komponentmi vstrekovačov, ktoré vznikajú kvôli vysokému tlaku. Keďže tlak je v systéme common-rail prítomný nepretržite, aj prostredníctvom malého úniku môže dosiahnuť množstvo uniknutého paliva

väčší objem ako je množstvo vstreknutého paliva [20]. Podľa oboch spomenutých spoločností je najväčším problémom zvýšený statický únik, ktorý sa označuje aj ako parazitický. Statický únik znižuje efektívnosť celého palivového systému, pretože je potrebné prečerpať väčšie množstvo paliva a nijak neprispieva k fungovaniu tohto systému [19; 20]. V roku 2019 bola uskutočnená štúdia [9] zaoberajúca sa tlakovými obmedzeniami systému common-rail. Výsledky experimentov, ktoré boli podniknuté, ukázali, že v danom prípade existoval takzvaný superkritický tlak v hodnotách 300 MPa až 350 MPa. Po dosiahnutí tohto tlaku palivo začína meniť svoje fyzikálne vlastnosti, a preto musia byť na popis jeho správania zostavené nové rovnice zohľadňujúce tieto zmeny. Tieto vysoké tlaky majú vplyv aj na rýchlosť pohybu vstrekovacieho ventilu. Pri prekročení superkritických tlakov sa možnosť ovládať vstrekovacie ventily zhoršuje. Dochádza ku poklesu možných počtov vstrekov v danom časovom úseku [9]. Na základe výsledkov tejto štúdie je možné vyvodiť záver, že ďalšie zvyšovanie vstrekovacích tlakov nad uvedené hodnoty je technologicky príliš náročné v porovnaní s benefitmi, ktoré by toto navýšenie prinieslo.

Ďalšie navyšovanie tlaku je obmedzené aj javom, ktorý sa nazýva kavitácia. Kavitácia je jav, ktorý nastáva, ak je kvapalina vystavená náhlemu poklesu okolitého tlaku. Pri tomto jave vznikajú „mikrobubliny“, ktoré následne implodujú. Kavitácia môže narušiť charakter prúdenia kvapaliny alebo poškodiť povrchy dôležitých komponentov vo vstrekovacích ventiloch [18]. Štúdium tohto fenoménu sa v súčasnosti realizuje pomocou simulácií, pretože vzhľadom na povahu riešeného problému (malé rozmery často menej ako jeden milimeter, krátke časové úseky v rádoch milisekúnd a tlaky 100 MPa a viac, rýchlosti prúdenia v stovkách metrov za sekundu) by vizuálne experimentálne metódy boli nerealizovateľné [18]. So zvyšujúcim sa tlakom sa zvyšuje aj prietok paliva vstrekovacím systémom a pri zachovaní geometrie sa zvyšuje aj tlaková diferencia v kritických častiach systému, čo vedie ku vzniku kavitácie. Kavitácia sa prirodzene vyskytuje v blízkosti ovládacieho ventilu, kde môže okrem ovplyvnenia prúdenia paliva poškodiť aj dosadacie plochy, čím môže spôsobiť vznik úniku (viď Obr. 2) [18].



Obr. 2 Dosadacia plocha ovládacieho ventilu poškodená kavitáciou; upravené podľa [18] Okrem tohto miesta kavitácia často vzniká v okolí trysiek (viď Obr. 3) [21]. V tomto prípade môže mať

zvyšovanie tlaku kontraproduktívny charakter. Ak zvyšujeme totiž tlak za účelom zlepšenia charakteristík prúdu vstreknutého paliva v spaľovacej komore, vzniknutá kavitácia naruší geometriu trysky a prúd paliva už nebude mať pôvodne navrhované parametre. Preto je potrebné s kavitáciou počítať a ideálne jej prechádzať. Ovplyvniť to je možné zmenou geometrie vstrekovacej trysky či vstupu do trysky [22]. V prípade obyčajného valcového vstrekovacieho otvoru trysky dochádza vplyvom kavitácie ku zmenšeniu efektívneho priemeru a zvýšeniu rýchlosti vstrekovanej prúdu paliva [21]. Rovnako ako v prípade dosadacích plôch ovládacieho ventilu, v miestach, kde vzniká kavitácia v okolí trysky, je možné pozorovať erozívne účinky tohto javu [23].



Obr. 3 CT-sken vstrekovacej trysky poškodennej kavitáciou; upravené podľa [23]

2.2 FILTRÁCIA A KVALITA PALIVA

Ďalšou výzvou v prípade veľkých motorov je vysoký prietok paliva a problémy spojené s jeho filtráciou. Nakoľko vysoké tlaky v systéme si vyžadujú veľmi presnú výrobu a malé tolerancie, je filtrácia paliva, pred tým, ako vstúpi do vysokotlakovej časti vstrekovania, veľmi dôležitá [3]. Kvôli neustále sa zvyšujúcim vstrekovacím tlakom a snahe znižovať statický únik, sa stáva čistota paliva dôležitou súčasťou správneho fungovania common-rail systému [19]. Keďže agregáty tohto typu pracujú v rôznych podmienkach a v rôznych krajinách celého sveta, kvalita paliva je veľmi ťažko kontrolovaný parameter. Z tohto dôvodu sa výrobcovia vstrekovacích systémov sústreďujú na zvyšovanie odolnosti jednotlivých komponentov voči rôznym druhom a kvalitám používaného paliva.

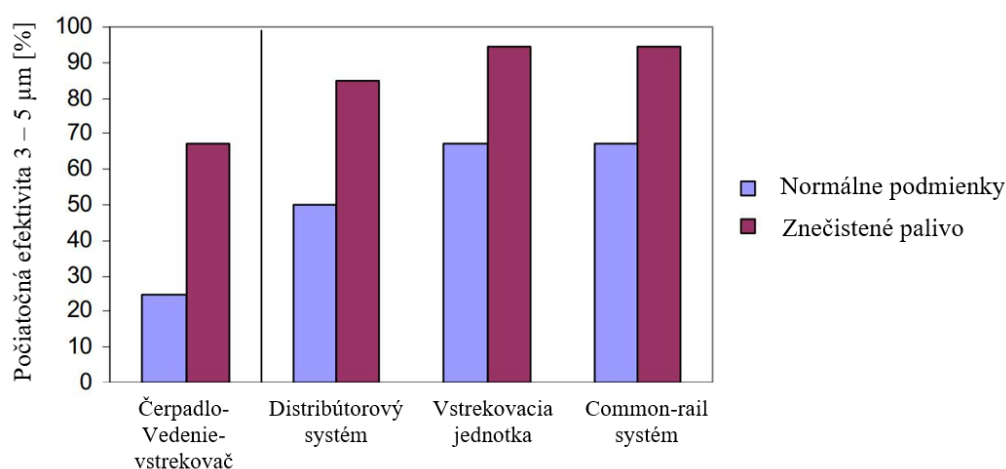
Nafta a jej zloženie prešla mnohými rokmi vývoja, čo malo za následok vznik rôznych druhov nafty z hľadiska jej výroby a fyzikálnych vlastností. Najjednoduchšie rozdelenie nafty je rozdelenie na naftu používanú vo vozidlách určených pre cestnú premávku a na naftu určenú pre použitie mimo tento sektor. Nafta používaná vo vozidlách a zariadeniach pracujúcich mimo cestnej premávky v takzvaných „off-road“ aplikáciách je často nižšej kvality a býva zafarbená, aby nedochádzalo k ich zamieňaniu, nakoľko táto nafta je často nižšej kvality a mohla by spôsobiť poškodenie vstrekovacieho systému vozidiel prevádzkovaných v cestnej premávke [24]. Naftu je ďalej možné rozdeliť na základe spôsobu jej výroby, čo má veľký vplyv na jej výsledné chemické zloženie a fyzikálne vlastnosti. Prvým druhom v tomto rozdelení je ropná nafta. Tento druh nafty je v súčasnosti najviac zastúpeným a používaným druhom nafty na trhu [25]. Ropná nafta je vyrábaná destiláciou z ropy pri teplotách 200 °C až 300 °C [25]. Ďalším druhom je syntetická nafta, ktorá vznikla v rámci snahy o získanie náhrady fosílnych palív kvôli údajnému znižovaniu sa celosvetových zásob ropy. Táto nafta sa vyrába syntézou vodíka

a oxidu uhličitého, pričom pri získavaní oxidu uhličitého je snaha o využívanie takzvaného odpadného oxidu uhličitého z rôznych druhov výroby alebo jeho zachytávanie z atmosféry [26]. V posledných rokoch sa zvyšuje zastúpenie takzvanej bionafty. Ide o obnoviteľnú alternatívu k ropnej naftě, pričom je vyrábaná z rôznych rastlinných olejov, živočíšnych tukov a odpadných olejov [24].

Na trhu sa objavuje čoraz väčšie zastúpenie biopalív z dôvodu snahy o znižovanie produkovaných emisií či níženie závislosti na používaní fosílnych palív. Tieto palivá sa môžu vyskytovať v podobe zmesi ropnej nafty a biopaliva alebo ako čisté biopalivá. Ako výhodné riešenie spomenutých problémov je využitie alternatívnych palív v kombinácii so systémom common-rail. Tieto palivá môžu vykazovať rozdielne hodnoty výhrevnosti, hustoty a viskozity v porovnaní s ropnou naftou, a preto je nutné počas návrhu vstrekovacieho systému myslieť aj na možnosť využívania alternatívnych palív [27]. Ich fyzikálne vlastnosti sa okrem viskozity a výhrevnosti líšia aj v teplote samovznietenia či zložení výfukových plynov produkovaných pri spaľovaní biopalív [28]. Okrem týchto premenných je nutné pri návrhu vstrekovacích systémov do veľkých motorov brať do úvahy aj rôzne podmienky, v ktorých sú tieto motory prevádzkované.

V ťažobnom priemysle kedy sa motory prevádzkujú v prašnom prostredí, ktoré obsahuje pevné častice, sa tieto častice často dostávajú do palivového systému pohonných jednotiek [29]. Podľa mnohých zdrojov [30; 31; 32] je takto znečistené palivo najčastejšou príčinou porúch precízne vyrobených komponentov systému common-rail. Okrem už spomenutého opotrebenia spôsobeného kavitáciou preto výrazne vplyva na životnosť týchto komponentov abrazívne opotrebenie spôsobené tvrdými časticami vyskytujúcimi sa v palive. K riešeniu tohto problému je možné pristúpiť rôzne. Súčiastky, ktoré sú vystavené tomuto druhu opotrebenia, je možné ochrániť rozličnými povlakmi [33]. Ďalšou z možností je odstrániť tieto častice z palivového obehu úplne, čo však nie je možné a najčastejšie sa používa kombinácia týchto prístupov. Z hľadiska druhov pevných častíc ako kontaminantov obsiahnutých v palive sú pre vstrekovací systém najnebezpečnejšie rôzne druhy minerálov ako napríklad oxid kremičitý, ktorý pôsobí ako veľmi tvrdý abrazívny materiál a vyskytuje sa vo veľkostiach od 1 μm do 50 μm [34]. Najbežnejší spôsob ako odstrániť tieto častice z palivového systému je použitie filtračného systému, ktorý odstraňuje tieto častice ešte pred tým, ako vstúpia do vysokotlakového systému, ktorý obsahuje komponenty citlivé na tento druh znečistenia. Filtračný systém naftovej pohonnej jednotky by mal byť schopný zachytiť častice s veľkosťou viac ako 50 μm , aby bolo zabránené upchatiu vstrekovacích ventilov, mal by tiež zachytiť maximálne možné množstvo častíc s veľkosťou 5 μm až 15 μm , aby neboli ovplyvňované parametre vstrekovania [34]. Efektívnosť filtrácie dosahuje obzvlášť vysoké hodnoty pre systém common-rail kvôli jeho komplexnosti (viď Obr. 4). V oblasti filtrácie paliva sú v konflikte dva parametre a to efektívnosť filtrácie a prietok paliva, ktorý tento systém dokáže sprostredkovať. Príliš vysoká efektívnosť filtrácie obmedzuje prietok palivovým systémom, ak nie sú zmenené rozmery filtrov. Keďže vložka filtra vo väčšine prípadov funguje na princípe zadržiavania nečistôt, táto jemná vložka by sa pri používaní znečisteného paliva veľmi rýchlo upchala. V praxi sa preto používajú filtre, ktoré pozostávajú z dvoch častí: hrubý filter, niekedy nazývaný aj predfilter a jemný filter [34]. Výhodou tohto riešenia je vyššia kapacita hrubého filtra ktorý, posielá do jemného filtra už predčistené palivo, čo predlžuje interval výmeny palivového filtra [34]. V mnohých prípadoch konštruktéri vstrekovacích systémov pre veľké motory implementujú dodatočný filter paliva do jednotlivých vstrekovačov. Medzi tieto vstrekovače patria napríklad vstrekovače od spoločnosti L'Orange série 4000 či CRIN-LE vstrekovače od spoločnosti Bosch. Rovnako ako v oblasti malých tak aj veľkých vznetových motorov je snaha o predĺženie servisných intervalov

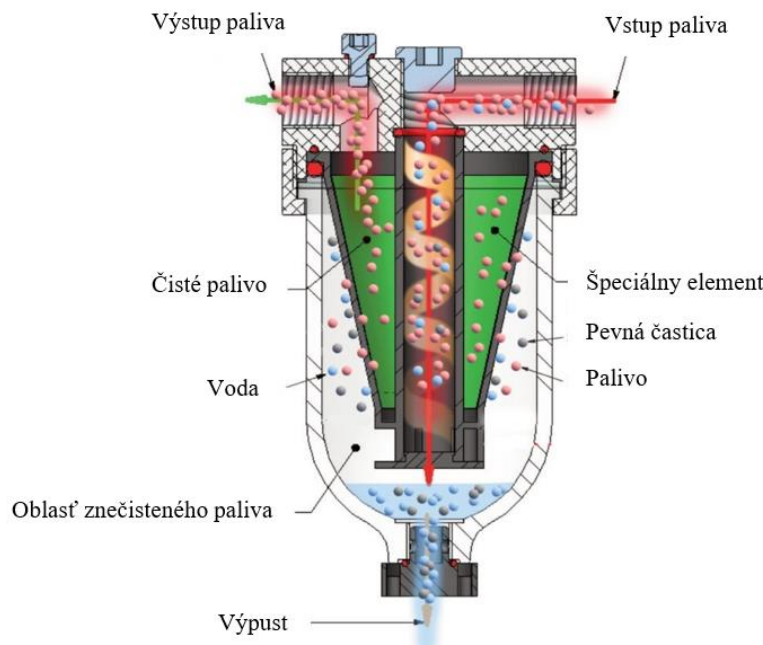
a nákladov. Oblasť filtrácie paliva má vplyv na oba faktory, a preto je dôležité sa touto problematikou zaoberať.



Obr. 4 Porovnanie nárokov na čistotu paliva rôznych vstrekovacích systémov; upravené podľa [34]

V lodnom priemysle býva palivo často výraznejšie kontaminované vodou [35]. Voda, ktorá sa z nádrže dostane do systému common-rail, ovplyvňuje mazacie vlastnosti nafty, môže spôsobovať reštrikciu v palivovom vedení, ak dôjde k jej zamrznutiu pri teplotách pod nulou [36]. Voda tiež vytvára chemické zlúčeniny s naftou, ktoré majú kyselinový charakter a poškodzujú tak palivový systém [37]. Voda ďalej vytvára vhodné prostredie na vznik elektrochemickej korózie, ktorá následne produkuje častice oxidov železa [38]. Tieto častice ďalej kolujú v palivovom systéme a môžu spôsobovať už spomínané abrazívne opotrebenie. Kvôli tomuto sa snažia výrobcovia zaradiť do procesu filtrácie paliva aj odľučovanie vody. Samozrejme, voda sa môže v nafte nachádzať v rôznych formách v závislosti na teplote a chemickom zložení nafty [39]. Na základe tohto je odľučovanie vody z nafty komplikovaná téma. Veľký problém predstavuje aj nadmerné množstvo vody obsiahnutej v bionaftách. Bionafta sa v súčasnosti vyskytuje vo väčšine komerčne ponúkaných druhov nafty. Štúdia [39] poukazuje na fakt, že bionafta má schopnosť do seba absorbovať oveľa väčší objem vody ako klasická ropná nafta. V tomto konkrétnom experimente išlo o 10 až 15 násobné hodnoty pri konštantných podmienkach. Štúdia tiež poukazuje na potencionálny vznik mikrobiálnych kolónii v palivových nádržiach [39]. Toto sa môže prejavovať hlavne pri pohonných jednotkách pracujúcich v krátkych časových intervaloch ako napríklad záložné zdroje elektrickej energie. Ak sa voda nesePARovala a neusadila na dne palivovej nádrže, je nutné ju v procese filtrácie odlúčiť. Na tento účel sa používajú separátory vody (viď Obr. 5). Separátor vody je zariadenie, ktoré sa umiestňuje do série nízkotlakového vedenia paliva spolu s klasickým palivovým filtrom. Princíp fungovania väčšiny separátorov vody dostupných na trhu je podobný. Palivo kontaminované vodou vstupuje do separátora, kde najskôr prechádza filtrom zo skladaného papiera, ktorý má hydrofóbne vlastnosti, a tým pomáha združovať vodu do väčších kvapiek [40]. Voda následne vplyvom gravitačného zrýchlenia padá na dno misky, ktorá je umiestnená v spodnej časti separátora [40]. Miska, v ktorej sa zbiera separovaná voda, býva často z priehľadného materiálu, aby obsluha stroja mohla jednoduchšie sledovať hladinu akumulovanej vody a v prípade potreby túto misku vyprázdniť. Tieto separátory môžu byť aj súčasťou klasického palivového filtra. Voda sa týmto spôsobom jednoduchšie odľučuje z paliva, ktoré má vyšší obsah síry [37]. Nafta, ktorá obsahuje menej síry, obsahuje menej aditív a následne menej surfaktantov [37]. Surfaktanty, ktoré sa nachádzajú vo vysoko aditivovaných

palivách, pokrývajú médiá separátorov vody, a tým znižujú ich účinnosť [37]. Pri vývoji biopalív a ostatných alternatívnych palív sa dbá na zníženie obsahu síry, čo kvôli spomenutému javu pridáva na dôležitosti problému odlučovania vody z paliva používaného v systémoch common-rail.



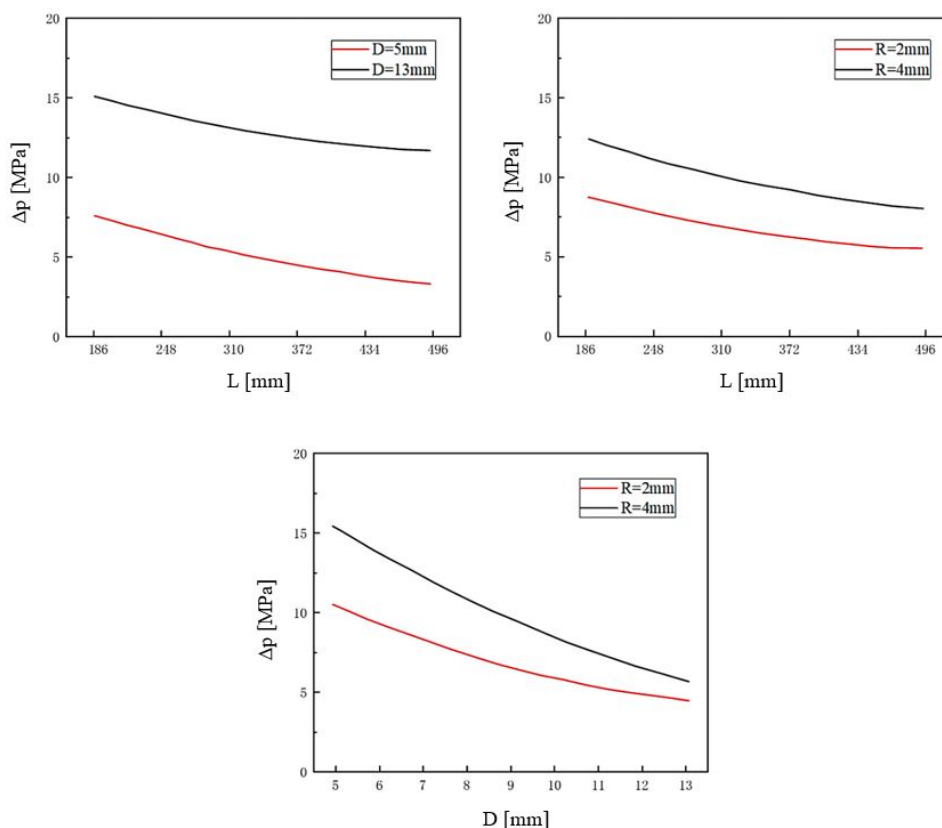
Obr. 5 Schéma funkcie separátora vody; upravené podľa [41]

2.3 FLUKTUÁCIA TLAKU VO VYSOKOTLAKOVEJ ČASTI SYSTÉMU

Počas trvania vstreku paliva do valca prúdi palivo cez vstrekovač pod vysokým tlakom a s relatívne veľkým objemovým prietokom. Po ukončení vstrekovacieho cyklu palivo neprestane okamžite prúdiť, ale nastane jav nazývaný hydraulický ráz [42]. Tento jav sa prejavuje prudkým nárastom tlaku na určité špičkové hodnoty. Môže byť spôsobený rôznymi faktormi, napríklad náhlou zmenou v rýchlosti prúdenia vplyvom uzatvorenia ventilu [43]. V prípade systému common-rail ide práve o náhly pokles prietoku cez vstrekovač, ktorý spôsobuje prudký nárast tlaku v spoločnom akumulátore tlaku. Po ukončení vstrekovacieho cyklu sa kinetická energia premení na lokálny nárast tlaku [42]. Tento nárast tlaku sa ďalej šíri vysokotlakovou časťou systému a ovplyvňuje aktuálny vstrekovací tlak ostatných vstrekovačov [44]. Vplyv tejto zmeny tlaku, alebo inak povedané tlakovej vlny, je najviac evidentný, ak pohonná jednotka pracuje s viacerými vstrekmami počas jedného cyklu [45]. Fluktuácia tlaku je problematická hlavne z hľadiska riadenia vstrekovacieho procesu v motore, ktorý má viac valcov. Tlakové vlny sa totiž šíria vysokotlakovým systémom medzi jednotlivými vstrekovačmi cez spoločný zásobník tlaku [46]. Na veľkosť týchto zmien tlaku má vplyv mnoho faktorov. Medzi hlavné faktory môžu byť zaradené rozmery akumulátora tlaku a množstvo vstrekovanej paliva v jednotlivých vstrekoch [47; 48].

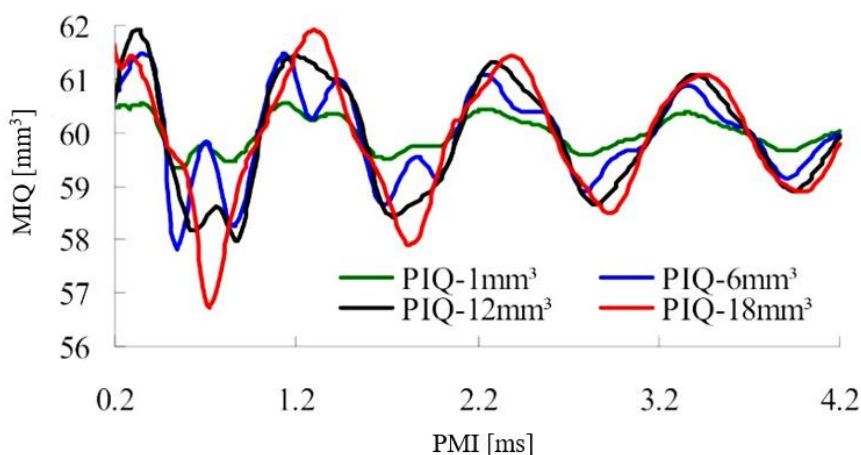
Ako už bolo spomenuté rozmery akumulátora tlaku majú významný vplyv na šírenie a tlmenie týchto tlakových vln. Štúdia [47], v ktorej bola simulovaná pohonná jednotka s vysokotlakovým systémom common-rail v programe AMESim 2020 preukázala, že vplyv na tlmenie rázov má

ako dĺžka akumulátora tak aj jeho priemer a priemer vysokotlakového vedenia. Avšak väčší vplyv má priemer akumulátora. Táto štúdia dokázala, že ak dokážeme optimalizovať spomenuté rozmery, je možné znížiť veľkosť tlakových fluktuácií o 21,66 %. Výsledné závislosti sú vyobrazené na obrázku Obr. 6, kde L = dĺžka akumulátora, D = priemer akumulátora a R = priemer vysokotlakového vedenia paliva, ktoré spája čerpadlo, akumulátor a vstrekovače.



Obr. 6 Grafy vplyvu rozmerov akumulátora na zmenu tlaku Δp ; upravené podľa [47]

Ďalším faktorom, ktorý významne zvyšuje tlakové pulzácie, je vstrekované množstvo paliva a to predovšetkým množstvo paliva vstreknuté v takzvanom predvstreku. Výsledky štúdie, ktorá je založená na numerickom modeli v programe AMEsim [48], poukazujú práve na tento fenomén. Bolo dokázané, že množstvo vstrekovaného paliva v predvstreku priamo ovplyvňuje množstvo paliva vstreknutého v hlavnom vstreku. Množstvo paliva v predvstreku nemá vplyv len na amplitúdu množstva hlavného vstreku, ale aj na periódu fluktuácii, ktoré nastanú [48]. Zistené závislosti sú zobrazené na obrázku Obr. 7, kde PIQ je množstvo vstreknutého paliva v predvstreku, MIQ v hlavnom vstreku a PMI je doba, počas ktorej sa uskutočnia oba vstreky.

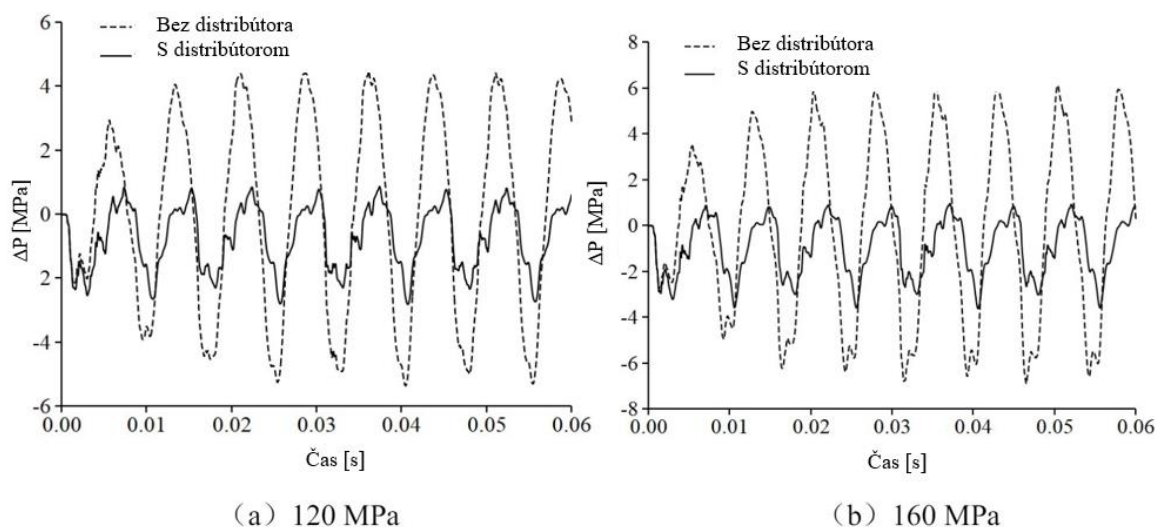


Obr. 7 Závislosť množstva vstreknutého paliva v hlavnom vstreku na množstve paliva v predvstreku; upravené podľa [48]

Na veľkosť amplitúdy tlakových vln vplýva samotný vstrekovací tlak. Ak je vstrekovací tlak zvyšovaný, tak je zvyšovaná aj amplitúda pulzov [14]. So zvyšujúcou sa teplotou paliva klesajú maximálne tlakové špičky v systéme [14]. Tlakové vlny konkrétne ovplyvňujú schopnosť presne riadiť proces vstrekovania, ak ide o viac vstrekov na cyklus a to tak, že spôsobuje abnormálne otváranie a zatváranie vstrekovacieho ventilu [14]. Nakoľko v súčasnosti je viac vstrekov na jeden cyklus v podstate štandard, ak ide o systém common-rail, vyššie uvedenému javu nie je možné sa vyhnúť. Ak by však systém common-rail mal pracovať s vysokou presnosťou, je nutné tento problém eliminovať.

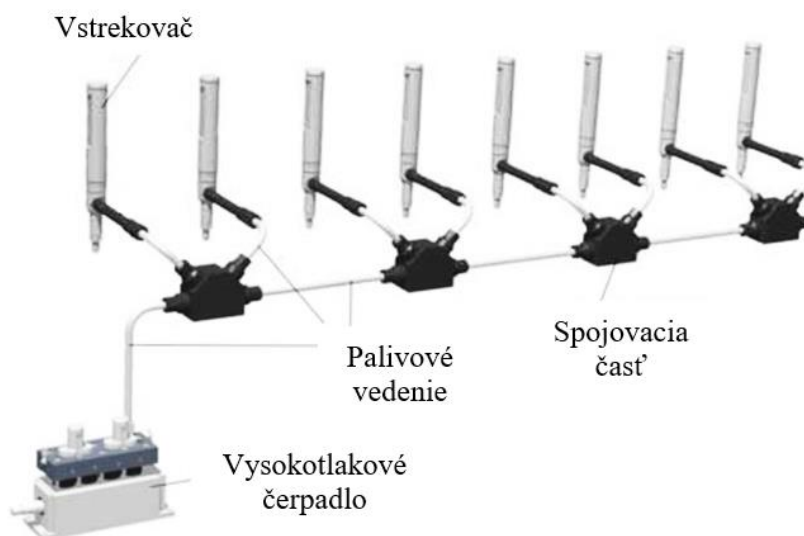
Ako jedno z možných riešení sa ponúka vyžitie Žukovského vzťahu, ktorý popisuje vplyv parametrov hydraulického systému na veľkosť tlakovej vlny vzniknutej hydraulickým rázom. V tomto vzťahu vystupuje hustota kvapaliny, rýchlosť šírenia tlakovej vlny a rýchlosť prúdenia [49]. Z týchto parametrov je možné z hľadiska konštrukcie systému ovplyvniť rýchlosť šírenia tlakovej vlny, pretože je priamo ovplyvnená tuhosťou systému. Znižovaním tuhosti systému by bolo teoreticky možné znížiť túto rýchlosť, a tým doceliť nižšiu amplitúdu tlakových vln, avšak znižovanie tuhosti systému by malo za následok zníženie jeho pevnosti, čo je v prípade súčasnej snahy o zvyšovanie vstrekovacieho tlaku nežiadúce. Preto jedným z najvyužívanejších riešení je implementácia distribútora alebo zásobníka (akumulátora) tlaku do vysokotlakového vedenia paliva. Túto úlohu v prípade osobných automobilov s menšími pohonnými jednotkami plní spoločný zásobník tlaku nazývaný „rail“ [3]. V prípade aplikácie systému common-rail na veľké motory však spoločný zásobník tlaku dosahuje svoje limity. Vzhľadom na parametre vstrekovania by totiž rozmerové parametre akumulátora boli neprimerane veľké a náročné na výrobný proces [44]. Z tohto dôvodu je nutné využívať dva a viac akumulátorov tlaku alebo využívať distribútor tlaku [44]. V roku 2022 bola uskutočnená štúdia [44], ktorá mala za úlohu kvantifikovať schopnosti tlmenia distribútora a na základe simulácií optimalizovať jeho rozmery. Distribútor v ponímaní tejto štúdie znamená hydraulické zariadenie, ktoré plní úlohu spojenia tvaru T s určitým objemom pričom rozdeľuje vysokotlakové vedenie vedúce z vysokotlakového čerpadla do jednotlivých zásobníkov paliva, ktoré sú v prípade tohto motora dva – jeden pre každý rad valcov (motor konfigurácie V). V simulácii figuroval ako motor bez distribútora tak aj motor s distribútorom, pričom oba motory mali klasický akumulátor v podobe railu. Štúdia dokázala významný vplyv distribútora na tlmenie tlakových rázov. V porovnaní amplitúdy bez distribútora a s distribútorom išlo o zníženie až o 62,28 % v prípade vstrekovacieho tlaku 120 MPa a 64,88 % v prípade vstrekovacieho tlaku 160 MPa.

Z uvedených parametrov vyplýva, že pri zvýšení vstrekovacieho tlaku sa efekt tlmenia distribútorom dokonca zvyšuje. Časový priebeh tlakového pulzu je možné vidieť na obrázku Obr. 8.



Obr. 8 Priebeh tlakovej vlny pre rôzne tlaky; upravené podľa [44]

Podobná závislosť bola vykazovaná systémom, ak sa predĺžila doba trvania vstreku a to konkrétne pri 2000 μs a 2600 μs nastal útlm o 63,07 % a 65,25 %. Okrem distribútorov sú využívané aj akumulátory tlaku, ktoré majú podobnú úlohu, sprostredkovať objem paliva, v ktorom sa energia obsiahnutá v tlakových rázoch môže dissipovať, a tým tlmiť tieto rázy [50]. Akumulátory sa môžu nachádzať zabudované v jednotlivých vstrekovačoch ako doplnok spoločného railu. Toto riešenie dovoľuje zmenšiť priemer vysokotlakového potrubia, ktoré vedie z railu do vstrekovača, vďaka čomu pri vstreknutí dôjde k vyššiemu poklesu tlaku v akumulátore, ktorý je zabudovaný vo vstrekovači ako v akumulátore, ktorý je spoločný, čím sa zabráni vzájomnému ovplyvňovaniu sa vstrekovačov [10]. Separátny akumulátor tlaku môže byť zabudovaný aj vo vysokotlakovom čerpadle [50]. Konkrétne riešenie kombinácie akumulátora a distribútora a ich umiestnenie sa líši v závislosti od výrobcu. V niektorých prípadoch sa využívajú aj systémy, ktoré spoločný zásobník tlaku nevyužívajú vôbec [51]. Úplné odstránenie spoločného akumulátora podľa návrhu spoločnosti Ganser-AG (viď Obr. 9) má mnohé výhody. Takto upravený systém je možné aplikovať na pohonné jednotky, ktoré podľa pôvodnej konštrukcie neboli vybavené systémom common-rail. Nie je totiž nutné vyrábať spoločný akumulátor tlaku pre každý takto upravovaný motor, čo vedie k značným zjednodušeniam a finančným úsporám [51].



Obr. 9 Vstrekovací systém common-rail bez spoločného akumulátora; upravené podľa [51]

Ďalším možným riešením je podľa výpočtových modelov použitých v štúdiu [14], ktoré boli neskôr overené experimentom, hydraulický filter. Tento hydraulický filter sa skladá z takzvanej tlmiacej diery a komory. V podstate ide o systém, ktorý je možné zaradiť do série pred vstrekovač. Vďaka tomu, že rozmery tohto systému môžu byť prispôbené danej aplikácii, ide o veľmi efektívne riešenie. Schopnosť tohto filtra tlmiť rázy je postavená na tvare a rozmeroch tlmiacej diery. Na základe výpočtov bolo dokázané, že existuje interval optimálneho priemeru tejto diery, kedy má hydraulický filter najväčšiu schopnosť tlmiť rázy. V danom prípade išlo o interval medzi 0 mm a 3 mm. V prípade, že je pre daný systém navrhnutý hydraulický filter s optimálnymi rozmermi, je schopný tlmiť tlakové rázy aj deviacie týkajúce sa prietoku vzniknuté predvstrekom aj rázy vzniknuté hlavným vstrekom [14]. Skúmané boli dve fázy vstrekovania: fáza pred hlavným vystrekovaním a fáza po hlavnom vstrekovaní. V prípade hlavného vstreku je možné týmto spôsobom znížiť amplitúdu tlakových rázov o 38 % až 70 % ak je minimálna doba vstrekovania 900 μs a o 63 % až 73 % v prípade pulzu medzi hlavným vstrekom a predvstrekom ak je minimálna doba vstrekovania 1100 μs . Amplitúda tlakového rázu vzniknutého medzi hlavným a dodatočným vstrekom môže byť znížená o 79 % až 92 %, ak je minimálna doba dodatočného vstreku 2500 μs .

V súčasnosti je tento problém fluktuácie tlaku v systéme common-rail veľmi aktuálny, keďže systém common-rail je využívaný na čoraz väčších pohonných jednotkách. Riešiť tento problém matematicky a kvantifikovať nie je jednoduchá úloha, čo dokázala aj štúdia [43], ktorej autori tvrdia, že so zvyšujúcou sa komplexnosťou systému rastie aj náročnosť kvantifikovania týchto tlakových vln kvôli tomu, že vlny v zložitom hydraulickom systéme, ktorým systém common-rail nepochybne je, medzi sebou interagujú.

3 VSTREKOVAČE PRE VEĽKÉ MOTORY

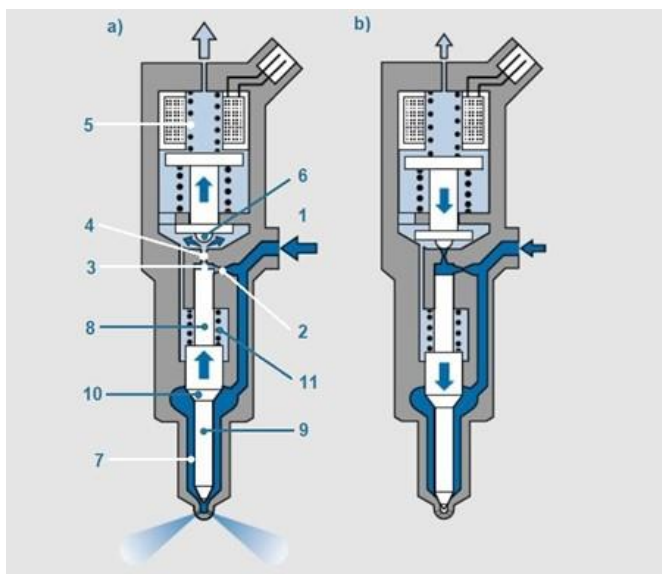
Ako bolo spomenuté v úvodnej kapitole, riešenie ovládania vstrekoваča pre systém common-rail je možné rozdeliť do dvoch veľkých základných skupín a to: vstrekoваče ovládané elektromagneticky alebo vstrekoваče ovládané piezoelektricky.

3.1 PIEZOELEKTRICKÉ VSTREKOVAČE

Piezoelektrické vstrekoваče fungujú na báze piezoelektrického javu. V skratke, ide o jav, kedy dochádza ku zmene rozmerov kryštálu za pôsobenia elektrického napätia [52]. V tomto type vstrekoваča sú tieto kryštály naskladané sériovo v takzvaných „piezo doštičkách“, ktorých sa môžu v závislosti od druhu vstrekoваča nachádzať až stovky [52]. Hlavnou výhodou tohto typu ovládania vstrekoваča je jeho rýchlosť. Vďaka krátkym časovým úsekom medzi vyslaním ovládacieho signálu a odpoveďou systému je možné presnejšie ovládať množstvo vstreknutého paliva [53]. Medzi výhody, ktoré ponúkajú piezoelektrické vstrekoваče, patrí aj ich schopnosť „polohovania“. Piezoelektrický aktuátor je totiž schopný variabilného posuvu ihly, ktorý je daný ovládacím napätím [53].

3.2 SOLENOIDOM OVLÁDANÉ VSTREKOVAČE

Napriek množstvu výhod, ktoré ponúkajú piezoelektrické vstrekoваče, vo väčšine prípadov veľkých motorov nájdeme v palivovom systéme implementované práve elektromagneticky ovládané vstrekoваče (Obr. 10). Je nutné spomenúť, že tieto motory sú prevádzkované za veľmi náročných podmienok ako napríklad kolísanie teplôt, napätia a iné. V porovnaní s piezoelektricky ovládanými vstrekoваčmi vykazujú solenoidové vstrekoваče niekoľkonásobne vyššiu životnosť, čo je v tomto sektore veľmi dôležitý faktor [19]. Princíp fungovania bude teda vysvetlený na tomto druhu vstrekoваča.



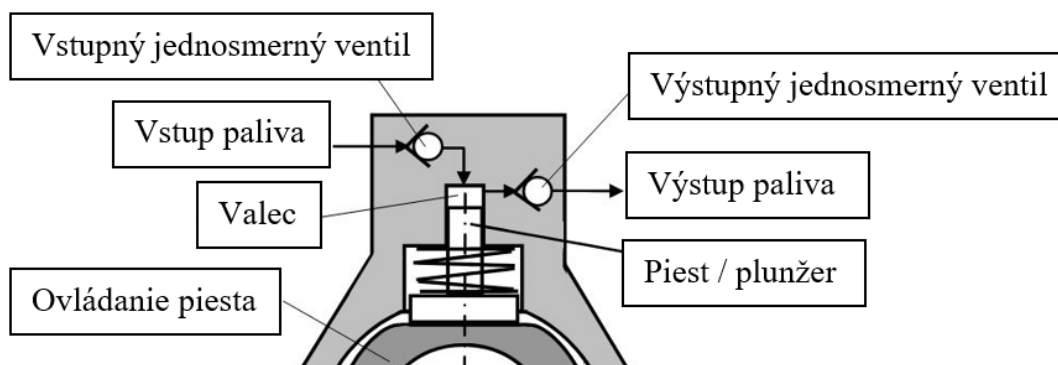
Obr. 10 Stručná schéma solenoidom ovládaného vstrekoваča; upravené podľa [3]

Palivo je pod vysokým tlakom dopravované cez vysokotlakový konektor (1) do trysky a cez vstupný obmedzovač prietoku (2) do ovládacej komory ventilu resp. ihly (3). Táto komora je spojená so spätným vedením paliva prostredníctvom výstupného obmedzovača prietoku (4). V prípade, že je vstrekoval v uzavretej polohe (b), tlak pružiny solenoidu (5) pôsobí na ventilovú guľu (6). V tejto fáze je možné povedať, že sily pôsobiace od tryskovej pružiny, sily od tlaku v raily pôsobiace na koncové plochy piestika a sily od tryskovej pružiny (11) pôsobia proti silám pôsobiacim na osadenie (10), ktoré sú spôsobené tlakom v tryskovej komore. Po vyslaní signálu pre zahájenie vstrekovacieho cyklu (a) je pomocou solenoidu nadvihnutá ventilová guľa, a tým sa umožní tok paliva do spätného vedenia paliva. Vďaka tomuto nastane pokles tlaku v ovládacej komore (3) pod hodnotu tlaku v tryskovej komore (7). Toto má za následok zníženie sily pôsobiacej na piestik (8) a otvorenie trysky posunom ihly (9). Po ukončení dodávky elektrického prúdu do ovládacieho solenoidu pružina vracia ventilovú guľu do uzatvorenej polohy, čím dôjde k nárastu tlaku v ovládacej komore a uzavretiu piestika. [3]

S neustále zvyšujúcim sa vstrekovacím tlakom sú kladené na vstrekovalce vysoké nároky. Zvyšujúci sa vstrekovací tlak, najmä tlak nad 150 MPa, má významný vplyv na úniky paliva vo vnútri vstrekovala [20]. Je to jeden z hlavných aspektov, ktorý môže pôsobiť ako limitujúci faktor pre návrh a konštrukciu vstrekovalcov pre ultravysoké vstrekovacie tlaky [54]. Statické úniky sú definované ako úniky počas doby, kedy je solenoid nečinný resp. napájaný el. prúdom, a teda sú spôsobené najmä netesnosťami medzi komponentami vstrekovala [55]. Naopak, dynamický únik je množstvo paliva, ktoré prechádza vstrekovalcom počas doby, kedy je solenoid napájaný elektrickým prúdom, to znamená množstvo paliva, ktoré prechádza výstupným obmedzovačom prietoku počas doby, kedy je ventilová guľa v otvorenej polohe [55]. Na základe experimentov, ktoré boli uskutočnené počas štúdie [55], je možné povedať, že množstvo uniknutého paliva oboma spôsobmi je priamo ovplyvnené tlakom v zásobníku paliva. Snaha o minimalizáciu predovšetkým statického úniku plynie z faktu, že pri nadmernom statickom úniku dochádza ku zahrievaniu vstrekovala a k znižovaniu efektivity vstrekovacieho systému, nakoľko predchádzajúci opis funkcie napovedá, že ovládacia komora a spôsob ovládania smeru prúdenia cez túto komoru sú kľúčové oblasti, ktoré môžu ovplyvniť funkcionality vstrekovala [19]. Mnohé spoločnosti sa preto snažia vyvinúť systém, ako smer prúdenia vo vstrekovali riadiť precíznejšie. Konvenčný druh ventilu sa často označuje ako dvojcestný ventil, ide teda o riešenie, ktoré nijak trvalo neoddeľuje vysokotlakovú časť a ovládaciu komoru [19]. Možné alternatívne riešenie tohto problému je takzvaný trojcestný ventil. Trojcestný ventil je schopný dočasne oddeliť ovládaciu komoru od vysokotlakovej časti systému. Na začiatku vstrekovania je ventil uzatvorený na vysokotlakovej strane a otvorený na nízkotlakovej strane, na konci vstrekovania je situácia opačná [19]. Spoločnosť Denso sa podieľala na vývoji trojcestného ventilu a zároveň definovala výhody tohto riešenia, medzi ktoré patrí najmä zvýšenie flexibility priebehu vstreku paliva [19]. Aplikáciou tohto typu ventilu je totiž možné ovládať rýchlosť uzatvárania a otvárania vstrekovacieho ventilu úplne nezávisle [19]. Na základe simulácií [56] je možné povedať, že efektívnosť dvojcestného ventilu je výrazne ovplyvnená tlakom v systéme, nakoľko tlak v systéme ovplyvňuje schopnosť ihly vstrekovací ventil otvoriť alebo zatvoriť. Na druhú stranu, trojcestný ventil, okrem už spomenutej výhody nulového statického úniku, ponúka aj značnú flexibilitu a to možnosť vstrekať veľmi malé množstvá paliva ako tzv. predvstrek.

4 VYSOKOTLAKOVÉ ČERPADLÁ PRE VEĽKÉ MOTORY

Vysokotlakové čerpadlá určené pre systém common-rail je možné rozdeliť na základe konštrukcie do dvoch skupín: radiálne a radové [3]. V drvivej väčšine sú v prípade veľkých vznetrových motorov využívané radové čerpadlá, ktoré sú poháňané mechanicky kľukovým alebo vačkovým hriadeľom resp. prevodom, ktorý spája toto čerpadlo a kľukový hriadeľ. Tieto čerpadlá sú zväčša mazané olejom na rozdiel od čerpadiel používaných v menších motoroch, ktoré sú mazané palivom [3]. K tejto skutočnosti viedol prirodzený vývoj motorov na základe oblasti ich využitia. Na rozdiel od menších pohonných jednotiek sú vysokotlakové čerpadlá používané vo veľkých motoroch vystavené vyššiemu zaťaženiu, čo priamo zvyšuje nároky na mazanie. Rizikom používania znečisteného paliva ako maziva vo vysokotlakových čerpadlách pre veľké motory je znížená životnosť týchto čerpadiel. Tomuto javu predchádza použitie oleja ako primárneho maziva. Vysokotlakové čerpadlá pracujú na základe posuvného pohybu piestika [50]. Piestik s pomocou jednosmerných ventilov nasáva a stlačuje palivo vo valci, ktoré je následne dopravované do vysokotlakového vedenia [57]. Do vysokotlakového čerpadla môže byť implementovaný aj elektronicky, často elektromagneticky ovládaný ventil, pomocou ktorého je ovládaný tlak [3; 50]. Spôsob akým sú realizované jednosmerné ventily ako aj spôsob pohonu a počet piestikov sa líši v závislosti od výrobcu. Vysokotlakové čerpadlá určené pre veľké motory sa odlišujú najmä tým, akým mechanizmom je prevádzaný vstupný rotačný pohyb na posuvný pohyb piestikov. V súčasnosti sú využívané 3 mechanizmy: vačkový, kľukový a mechanizmus s excentrickým hriadeľom, pričom každý zo spomenutých mechanizmov má svoje výhody a nevýhody. Je možné povedať, že vo väčšine prípadov sú využívané vačkové a excentrické mechanizmy. Nevýhodou týchto mechanizmov oproti mechanizmu kľukovému je vyššia náročnosť na výrobu a nutnosť aplikovať pružiny, ktoré zaisťujú návrat piestika do pôvodnej polohy. V prípade veľkých motorov obsahujú často vysokotlakové čerpadlá zásobník tlaku, takzvaný akumulátor. Tento akumulátor má za úlohu vyrovnávať tlakové zmeny, ktoré vznikajú ako činnosťou samotného čerpadla, tak aj činnosťou ostatných komponentov systému common-rail [50; 57]. Schematické znázornenie vysokotlakového čerpadla môžeme vidieť na obrázku Obr. 11.



Obr. 11 Jednoduchá schéma elementu vysokotlakového čerpadla; upravené podľa [57]

5 COMMON-RAIL SYSTÉMY OD SPOLOČNOSTI LIEBHERR

Liebherr je nemecká spoločnosť patriaca medzi svetových lídrov vo svojom odbore. Jednou z hlavných oblastí ich pôsobenia je mimo iné výroba a vývoj ťažkých stavebných strojov. Spoločnosť poskytuje systémy common-rail pre širokú výkonovú škálu pohonných jednotiek. Od 25 kW až po 290 kW na valec. Rovnako ako spoločnosť Bosch, majú v ponuke modulárny systém, čo zaručuje flexibilitu komponentov a veľa možností ich kombinácii pre rôzne pohonné jednotky. [58]

5.1 VSTREKOVAČE LIEBHERR

Spoločnosť v súčasnosti ponúka 2 druhy vstrekovačov LI2 a LI3. Oba sú určené na „off-highway“ aplikácie. Vstrekovač LI2 je navrhnutý pre výkony do 180 kW na jeden valec. Jeho inovatívny dizajn trojcestného ventilu umožňuje ovládanie rýchlosti otvárania aj zatvárania ihly. Toto umožňuje veľmi flexibilne nastavovať a ovládať vstrekovacie podmienky pre rôzne módy užívania stroja, a tak doceliť maximálnu možnú účinnosť a zároveň udržať produkciu emisií na povolených hodnotách. [59]

Vstrekovač LI3 je vyvinutý špeciálne na využitie vo veľkých vznetrových motoroch. S prietokom paliva takmer dvojnásobným oproti vstrekovaču LI2 môže byť použitý v motoroch s výkonom až 290 kW na jeden valec. Najvýraznejší rozdiel oproti vstrekovaču LI2 spočíva v tom, že vstrekovač LI3 využíva zabudovaný akumulátor tlaku. Tento akumulátor môže dosahovať objem do 43 cm³ a vďaka nemu je možné úplne vynechať externý zásobník tlaku – rail. Pre porovnanie budú v tabuľke Tab. 1 uvedené niektoré parametre oboch vstrekovačov. [60]

Tab. 1 Porovnanie vstrekovačov Liebherr LI2 a LI3; upravené podľa [59; 60]

	LI2	LI3
Tlak v systéme	25 – 220 MPa	30 – 220 MPa
Priemer trysky	7 mm / 9 mm	13 mm
Prietok paliva	600 – 2600 ml / 30 s	1600 – 4000 ml / 30 s
Počet vstrekov na jeden cyklus	5	4
Minimálny časový rozdiel medzi vstrekmami	250 μs	400 μs

5.2 VYSOKOTLAKOVÉ ČERPADLÁ LIEBHERR

Spoločnosť Liebherr sa pri konštrukcii svojich vysokotlakových čerpadiel zameriava na kompaktnosť, účinnosť, no predovšetkým na spoľahlivosť v extrémnych podmienkach. Kolísajúce teploty, čistota, druh paliva a vibrácie, toto všetko ovplyvňuje správny a spoľahlivý chod čerpadiel. Liebherr v súčasnosti ponúka dve vysokotlakové čerpadlá pre veľké motory: LP 11.5, LP11.6 [58]. Porovnanie parametrov týchto čerpadiel sa nachádza v tabuľke Tab. 2. Mazanie týchto čerpadiel je realizované olejom, aby bola docielená vyššia životnosť a spoľahlivosť [61]. Využitie mazania olejom a excentrického pohonu pomohlo navýšiť životnosť čerpadla až na hodnotu 15000 hodín [61]. V porovnaní s vačkovým pohonom majú tieto čerpadlá tichší chod, menšie rozdiely medzi špičkovým momentom a stredným momentom a celkovo nižšiu spotrebu výkonu [62].

Tab. 2 Porovnanie parametrov čerpadiel Liebherr LP 11.5 a LP 11.6; upravené podľa [62; 63]

	LP 11.5	LP11.6
Tlak v systéme	10 – 220 MPa	10 – 220 MPa
Maximálny prietok	810 l / h	970 l / h
Počet piestikov	5	6
Stredný točivý moment	135 Nm	160 Nm
Špičkový točivý moment	200 Nm	200 Nm
Menovité otáčky	4500 ot / min	4500 ot / min

Spoločnosť Liebherr pri návrhu týchto komponentov dbala aj na ich odolnosť a aplikovateľnosť v náročných podmienkach, o čom svedčí aj ich schopnosť odolávať rázom až do hodnoty 10 g a možnosť prevádzkovať tieto čerpadlá v teplotnom rozmedzí -30 °C až 125 °C [61].

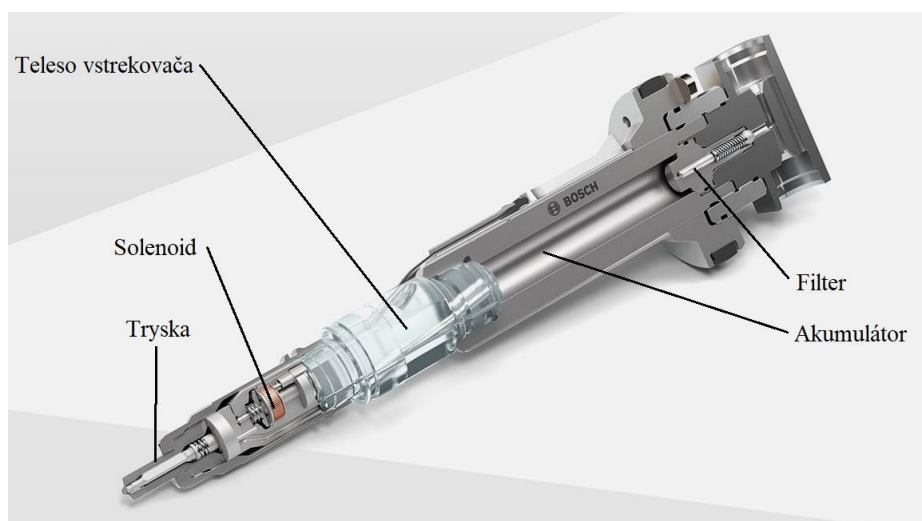
6 COMMON-RAIL SYSTÉMY OD SPOLOČNOSTI BOSCH

Spoločnosť Bosch sa dlhodobo venuje vývoju palivových systémov pre motorové vozidlá ako aj systémov pre teplotný manažment, senzorov a mnohých iných systémov. V oblasti vstrekovania paliva patrí Bosch Group medzi celosvetových lídrov. Dominuje nielen v segmente osobných automobilov ale aj v segmente veľkých motorov. [64]

Ako dominantný systém common-rail využívaný vo veľkých motoroch od tejto spoločnosti je takzvaný modulárny systém common-rail v skratke MCRS. Veľkou výhodou tohto systému je možnosť prispôbiť tento systém pre širokú škálu pohonných jednotiek z hľadiska výkonových parametrov. Spoločnosť Bosch udáva rozsah možného použitia 50 kW až 450 kW na jeden valec so životnosťou až 20000 hodín [22]. Tento systém je schopný vyvolať vstrekovací tlak v hodnotách až 220 MPa s možnosťou aplikovať tento systém na motory ktoré majú 6 až 20 valcov [65].

6.1 VSTREKOVAC CRIN-LE

V systéme MCRS je primárne využívaný solenoideom ovládaný vstrekovač CRIN-LE-22 (Obr. 12) [22]. Rýchlosť odozvy vstrekovača na pohyb solenoidu bola docieľená kombináciou umiestnenia solenoidu bližšie ku tryske, čo viedlo ku zmenšeniu jeho rozmerov a zmenšeniu jeho zotrvačnej hmoty [65]. Vstrekovač CRIN-LE tiež využíva zabudovaný akumulátor tlaku, čím je zabezpečený konštantný tlak a nie je nutné implementovať spoločný akumulátor tlaku [22]. Čo sa týka parametrov vstrekovača, je schopný pracovať s tlakom 220 MPa a počas jedného cyklu vstreknúť palivo až v piatich separovaných dávkach [66].

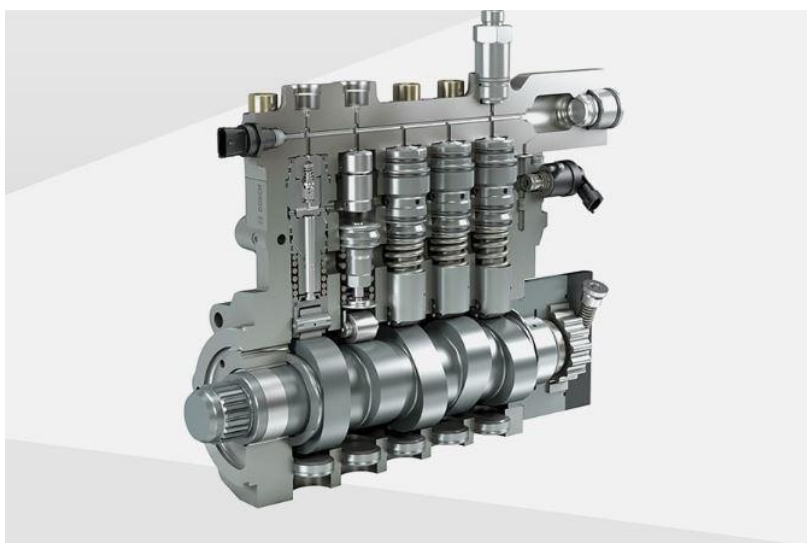


Obr. 12 Rez vstrekovačom CRIN-LE; upravené podľa [65]

Tento vstrekovač disponuje veľmi robustným a odolným dizajnom a kombinuje materiály ako nitrídaná oceľ a keramika. Vysoký tlak v systéme spôsobuje zvýšenie opotrebenia spôsobeného kavitáciou, tomuto je zabránené optimalizáciou geometrie zakrivenia vstupu do otvoru trysky [65]. Kuželovitý tvar otvoru trysky má za následok kontinuálne urýchľovanie paliva smerom k výstupnému otvoru trysky, a tým zamedzenie tvorby kavitácie vo vnútri trysky [65].

6.2 PALIVOVÉ ČERPADLO BOSCH CP9.1-22

Toto čerpadlo (Obr. 13), ktoré je využívané v modulárnom systéme common-rail, disponuje piatimi vysokotlakovými elementami, ktoré sú ovládané pomocou vačkového hriadeľa [50]. Styk týchto elementov s vačkovým hriadeľom je realizovaný prostredníctvom valčekov, ktoré sú uložené na bronzových uloženiach [65]. Rad čerpadiel CP9 sa vyznačuje vysokou flexibilitou a vďaka modulárnemu dizajnu je možné ho použiť v pohonných jednotkách s celkovým výkonom od 2200 kW do 4400 kW [65]. Rovnako ako v spomenutom vstrekováči je v tomto čerpadle zabudovaný akumulátor tlaku, ktorý zabezpečuje konštantný tlak a zabráňuje pretlakovaniu systému [50]. Oproti predošlej generácii čerpadiel CP9.1-16 došlo ku zlepšeniam týkajúcim sa schopnosti odolávať opotrebeniu za nízkeho tlaku maziva [65].

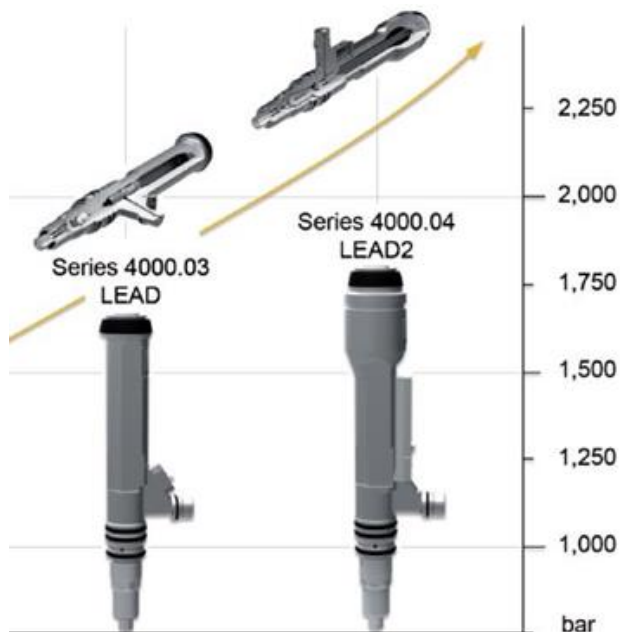


Obr. 13 Rez čerpadlom CP9; [50]

7 COMMON-RAIL SYSTÉMY OD SPOLOČNOSTI L'ORANGE

Spoločnosť L'Orange dodáva okrem iných systémov aj vstrekovacie systémy pre lodný, ťažobný a železničný sektor s viac ako 80 ročnou tradíciou [67]. Vo svojom portfóliu ponúkajú vstrekovacie systémy pre motory s výkonom od 1000 kW do 40000 kW vrátane systémov pre motory spaľujúce ťažký olej (mazut) [67]. Spoločnosť zaviedla systém vstrekovania common-rail prvýkrát v auguste roku 1997 do motora MTU série 4000 (Obr. 14) a od tej doby určujú štandardy systémov vstrekovania paliva pre veľké motory [68; 69]. Vstrekovače, ktoré sú ponúkané, sú ovládané elektromagneticky. Taktiež sú ponúkané varianty so zabudovaným akumulátorom tlaku, a čo je v súčasnosti už štandard pri systémoch common-rail, s možnosťou viacerých vstrekov počas jedného cyklu [70]. Čo sa týka vysokotlakových čerpadiel, parametre sa pohybujú v prípade prietoku až do 30 litrov za minútu a čo sa týka tlaku do 220 MPa, pričom sú primárne využívané čerpadlá, ktoré majú 2 až 4 piestiky [70].

L'Orange spolupracuje s výrobcom veľkých motorov a turbín MTU (Motoren und Turbinen Union). Ako už bolo spomenuté, prvý veľký sériovo vyrábaný vznetrový motor vybavený systémom common-rail bol práve motor MTU série 4000. V dobe uvedenia na trh bol tlak v palivovom systéme tohto motora 140 MPa, no v dnešnej dobe sa podarilo konštruktérom tento tlak dostať až na hodnotu 220 MPa a do budúcnosti je plánované zvýšenie na hodnotu 250 MPa [71]. Spoločnosť L'Orange rovnako ako už spomenutí poprední výrobcovia systémov common-rail pre veľké motory implementuje do svojich vstrekovačov akumulátory tlaku. Prvým vstrekovačom s integrovaným zásobníkom tlaku bol vstrekovač 4000.03 LEAD konštruovaný na tlak 180 MPa a bol nasledovaný vstrekovačom 4000.04 LEAD2 navrhnutým na tlak 220 MPa. [71]



Obr. 14 Vstrekovače motora MTU série 4000; upravené podľa [71]

Spomenutá pohonná jednotka tiež využíva vysokotlakové palivové vedenie s dvojitémi stenami. Toto je štandardom najmä v lodnom a železničnom priemysle a má za úlohu zvýšiť bezpečnosť prevádzky, nakoľko zabudované snímače dokážu zaznamenať možné úniky paliva [72].

8 COMMON-RAIL SYSTÉMY OD SPOLOČNOSTI GANSER

Spoločnosť Ganser vyvíja komponenty systému common-rail pre „off-highway“ aplikácie od roku 1978 a mimo vstrekovacích systémov pracujúcich s naftou vyvíja aj systémy „dual-fuel“ a systémy na vstrekovanie vodíka [73].

Dostupné vstrekovacie Ganser sa vyznačujú tým, že vďaka svojmu flexibilnému dizajnu nemajú vysoké požiadavky na zástavbový priestor, vďaka čomu sú výrazne znížené nároky na úpravy hlavy valcov. [74]. Spoločnosť Ganser má tiež patentovaný svoj vlastný vstrekovací ventil, vďaka ktorému je možné vstrekať palivo s vysokou frekvenciou, čo v kombinácii s rýchlym uzatváraním ventilu vedie k zníženiu obsahu škodlivín vo výfukových plynch a zvýšeniu efektivity [74]. Základné parametre tohto vstrekováča sú uvedené v tabuľke Tab. 3.

Tab. 3 Parametre vstrekováča Ganser pre lokomotívy; upravené podľa [74]

Vstrekovaný objem	500 mm³ / vstre
Pracovný tlak	160 MPa
Životnosť	22000 hodín
Priemer trysky	12,8 mm

Z radov vysokotlakových čerpadiel ponúka Ganser 1 až 8 piestikové čerpadlá, pričom vo svojej ponuke majú ako radiálne tak aj radové čerpadlá (Tab. 4).

Tab. 4 Parametre vysokotlakových čerpadiel Ganser; upravené podľa [75]

	Prietok	Pracovný tlak	Životnosť
Jednovalcové radové	1 l / min	120 MPa	30000 hodín
Trojvalcové radiálne	4 l / min	200 MPa	16000 hodín
Štvorvalcové radové	10 l / min	180 MPa	20000 hodín
Osemvalcové radové	20 l / min	180 MPa	20000 hodín

Táto švajčiarska spoločnosť sa zaoberá aj aplikáciou systémov common-rail na už existujúce vznietové pohonné jednotky, ktoré boli z výroby vybavené iným vstrekovacím systémom, ako napríklad klasickým mechanickým vstrekaním [15]. Dostupné sú v tomto prípade kompletné riešenia vstrekovania paliva konkrétne vysokotlakové čerpadlá, vstrekovacie, vysokotlakové vedenie s dvojitémi stenami, akumulátory tlaku a elektronické riadenie [15].

9 COMMON-RAIL SYSTÉMY OD SPOLOČNOSTI HEINZMANN

Spoločnosť Heinzmann ponúka vstrekovacie systémy common-rail pod obchodným názvom Odysseus, ktoré pokrývajú výkonovú radu od 150 do viac ako 10000 kW. V ponuke majú kompletné riešenia vstrekovania od vysokotlakových čerpadiel, vstrekočav, akumulátorov až po elektronické riadenie, ktoré sa predáva pod obchodným názvom Dardanos. [76]

Ponúkané vstrekočavy majú nulový statický únik, čím bol zredukovaný prietok paliva spätnou vetvou až o 75 % [76]. Podobne ako už spomenutí výrobcovia využívajú zabudovaný akumulátor vo vstrekočavi, čím sa im podarilo znížiť amplitúdu tlakových pulzácií o 25 % [76]. Všetky vstrekočavy ponúkané touto spoločnosťou sú ovládané elektromagneticky [77]. Do kategórie vstrekočav pre motory s výkonom približne 130 kW na valec spadajú vstrekočavy Odysseus ICR-DS-100 a Odysseus ICR-DS-200 (Tab. 5). Spomenuté vstrekočavy vo svojej konštrukcii tiež implementujú už spomenutý akumulátor tlaku a vstrekočav Odysseus ICR-DS-200 má navyše integrovaný filter paliva [77].

Tab. 5 Porovnanie parametrov vstrekočav Odysseus ICR-DS-100 a ICR-DS-200; upravené podľa [77]

	ICR-DS-100	ICR-DS-200
Maximálny výkon na jeden valec	100 kW	200 kW
Maximálny pracovný tlak	220 MPa	250 MPa
Množstvo vstreknutého paliva	10 – 500 mm ³ / vstreknutie	50 – 2500 mm ³ / vstreknutie
Druh paliva	nafta	nafta / HFO

Vysokotlakové čerpadlá Odysseus, na rozdiel od väčšiny konkurencie, využívajú na pohyb čerpacích elementov kľukový mechanizmus. Toto riešenie bolo zvolené kvôli tomu, že na rozdiel od systému, ktorý využíva excentrickú hriadeľ alebo vačkovú hriadeľ, nie sú potrebné pružiny, ktoré zabezpečujú návrat čerpacích elementov do počiatočnej polohy, vďaka čomu vykazujú tieto čerpadlá veľmi nízke hodnoty opotrebenia. Vďaka tomu, v spojení s hydrodynamickým režimom mazania, čerpadlá HDP-K nevykazujú takmer žiadne opotrebenie po dosiahnutí limitujúcej životnosti konvenčných čerpadiel pre common-rail systémy. Čerpadlá HDP-K zároveň dokážu predísť svojej úplnej deštrukcii v prípade zlyhania niektorého komponentu. V týchto čerpadlách sa totiž využíva systém, ktorý dokáže odpojiť piestik od kľukového hriadeľa v prípade poruchy. [77]

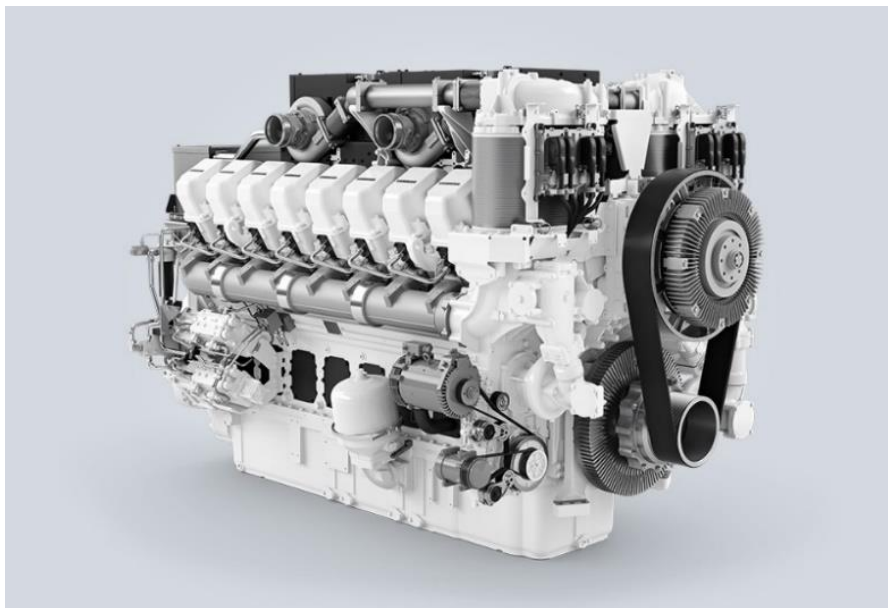
Tab. 6 Porovnanie parametrov vysokotlakových čerpadiel HDP-K2 a HDP-K3; upravené podľa [77]

	HDP-K2	HDP-K3
Maximálny tlak v systéme	220 MPa	240 MPa
Možnosti dĺžky zdvihu	6, 8, 10, 12 mm	12, 16 mm
Priemer piestikov	8 mm	10, 12, 14 mm
Maximálne otáčky	2400 ot / min	3000 ot / min (12 mm zdvih)
Maximálny prietok	2,5 l / min	15 l / min
Počet piestikov	2	3

10 APLIKÁCIE SYSTÉMOV COMMON-RAIL V KONKRÉTNÝCH POHONNÝCH JEDNOTKÁCH

10.1 LIEBHERR D9816

Motor Liebherr D9816 (viď Obr. 15) bol vyvinutý špeciálne pre ťažobný priemysel ako pohon pre hydraulické rýpadlá, sklápače a iné ťažké stroje [78]. Táto konfigurácia motora V16 dosahuje výkon 2017 až 3000 kW a je možné ho dodatočne upraviť na prevádzku v extrémnych poveternostných podmienkach [79].



Obr. 15 Motor Liebherr D9816 [78]

Táto pohonná jednotka je vybavená systémom common-rail Liebherr 11.5, ktorý využíva vstrekovače s individuálnymi akumulátormi tlaku pre zaručenie dynamickej odpovede systému a zvýšenie spoľahlivosti [79]. Tieto vstrekovače sú schopné dodávať palivo v množstve až 1000 mg počas jedného cyklu [80]. Vstrekovače zásobuje palivom vysokotlakové čerpadlo s maximálnym prietokom 900 litrov za hodinu pri tlaku 220 MPa [80]. Ďalšie parametre tohto motora sú uvedené v tabuľke Tab. 7. Oproti predošlej verzii vstrekovacieho systému Liebherr 11.2, ktorá dodáva palivo pre pohonné jednotky s výkonom 145 kW na valec, je nová verzia 11.5 montovaná do pohonných jednotiek s výkonom až 250 kW na jeden valec [81]. Tento vstrekovací systém dokáže vstrekať palivo vo viacerých intervaloch počas jedného cyklu. Presnosť vstrekovania je zabezpečená hydraulicky ovládaným trojcestným ventilom [81]. Využitie trojcestného ventilu umožňuje adaptovať rýchlosť pohybu ihly v každej situácii, čo zlepšuje presnosť a efektivitu vstrekovania paliva [80]. Veľká výhoda vstrekovačov v systéme 11.5 je úplná absencia statického úniku, čo minimalizuje množstvo paliva, ktoré sa vracia späť do nádrže a energiu s týmto spojenú. Vďaka tomuto je znížené aj zahrievanie vstrekovača [80]. Systém 11.5 ponúka dve verzie vstrekovacích čerpadiel, 5 a 6 piestikové, pričom obe čerpadlá sú typu LCRP 11.5 mazané olejom, aby bolo možné dosiahnuť dlhšiu životnosť [82].

Tab. 7 Základné parametre systému common-rail Liebherr 11.5; upravené podľa [82]

Tlak v systéme	25 - 220 MPa
Počet vstrekov na jeden cyklus	3
Prietok nafty	1600 – 4000 ml / 30 s
Priemer trysky	13 mm
Maximálne otáčky čerpadla	4000 ot / min
Maximálny objem podporovaného motora	4 – 6 l / valec
Maximálny ovládací únik pri tlaku 220 MPa	50 ml

10.2 CUMMINS QSK60

Americká spoločnosť Cummins je celosvetovo známa svojimi vznetrovými pohonnými jednotkami. Nezaostávajú ani v sektore veľkých motorov, kde ponúkajú niekoľko variant. Jednou z nich je model QSK60 (viď Obr. 17). Pohonná jednotka je ponúkaná v rôznych variantoch v závislosti od oblasti použitia. Medzi tieto oblasti patrí najmä lodný priemysel, ťažobný priemysel a výroba elektrickej energie. [83; 84; 85]



Obr. 16 Motor Cummins QSK60 [86]

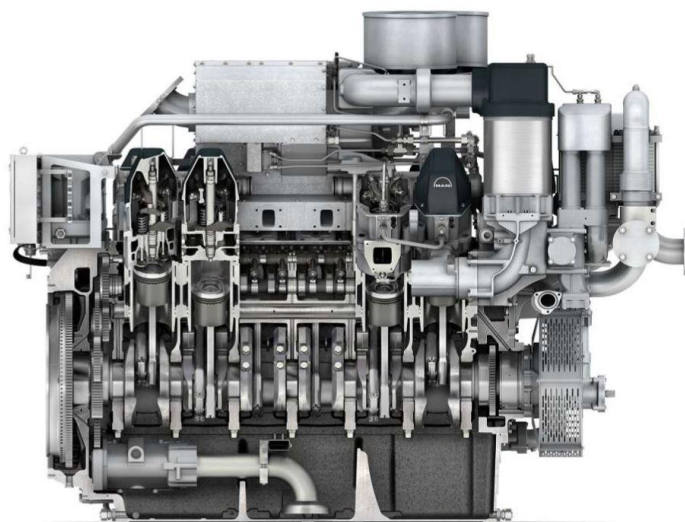
V závislosti na verzii tohto motora sa jeho výkon pohybuje v rozmedzí 1491 kW až 2013 kW [83]. V tomto agregáte je využívaný modulárny systém common-rail, ktorý napomohol v porovnaní so vstrekovacím systémom využívaným v predošlých modeloch znížiť spotrebu o 2 %, predĺžiť časový interval medzi generálnymi opravami o 10 %, a tiež znížiť koncentráciu pevných častíc vo výfukových splodinách až o 63 % [84]. Rovnako ako v modulárnom systéme od spoločnosti Bosch, aj v prípade motora od spoločnosti Cummins sú využívané vstrekovače s vlastným akumulátorom tlaku, ktoré dokážu vstreknúť palivo viackrát za jeden cyklus [87; 88]. Podobne ako pri agregáte Liebherr D9816, sú využívané vstrekovače s nulovým statickým únikom, aby bolo predídene parazitickým stratám v palivovom systéme [87]. Palivové čerpadlo má vylepšený zdvihátkový dizajn, je chladené pomocou paliva a obsahuje zabudovaný filter [87; 85]. Tlak v palivovom systéme sa v prípade jednotky QSK-60-G12 pohybuje na úrovni 160 MPa [85]. Ďalšie parametre tohto motora sú uvedené v tabuľke Tab. 8.

Tab. 8 Základné parametre pohonnej jednotky Cummins QSK60; upravené podľa [87]

Typ motora	60° V16
Objem motora	60 l
Vrtanie x zdvih	159 mm x 190 mm
Preplňovanie	jednostupňové / dvojstupňové
Vstrekovací systém	modular common-rail

10.3 MAN 175D

Spoločnosť MAN energy solutions je spoločnosť s bohatou históriou, ktorá v súčasnosti vyrába vznetrové agregáty pre rôzne odvetvia priemyslu. Pohonná jednotka MAN 175D (viď Obr. 17) je označovaná aj ako najvšestrannejšia v sektore vysokorýchlostných vznetrových agregátov pre lodný priemysel [89]. Používa sa primárne ako pohon vlečných člnov, trajektov, jacht a armádnych plavidiel [89]. V ponuke sú 12, 16 a 20 valcové verzie vo výkonovom rozpätí 1440 kW až 4400 kW [90]. V súčasnosti je dokonca verzia MAN 20V175D-ML s výkonom 4400 kW pri 2000 otáčkach za minútu najvýkonnejším vysokorýchlostným vznetrovým motorom na svete [90]. O dopravu paliva a jeho prípravu sa stará systém common-rail [89].



Obr. 17 Rez pohonnou jednotkou MAN 12V175D-MH/MM [90]

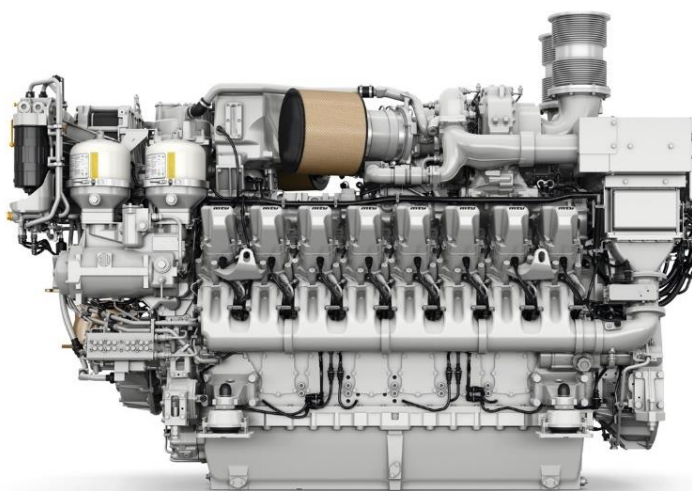
Systém common-rail v motore MAN 175D je najmodernejší svojho druhu [90]. Tlak v tomto systéme dosahuje hodnoty 220 MPa a kvôli tomu je implementované dvojvrstvé vysokotlakové potrubie na zaistenie bezpečnosti obsluhy počas prevádzky [90]. Podobne ako predošlé pohonné jednotky je tento systém modulárny a pri jeho vývoji sa kládol dôraz na to, aby vysokotlakové vedenie bolo čo najkratšie [90]. Vstrekovače sú vybavené vlastnými akumulátormi, aby bolo zabránené rozdielom vstrekovaného objemu paliva v najväčšej možnej miere [90]. Vysokotlakové čerpadlo je klasicky poháňané priamo a mechanicky a palivo je pre toto čerpadlo dodávané pomocou mechanického podávacieho čerpadla [90]. Zaujímavosťou tohto motora je možnosť vymieňať palivový filter počas chodu motora, konštruktéri docielili túto možnosť tým, že implementovali ventil, ktorým je možné prepínať medzi rôznymi filtračnými okruhmi [90]. Základné parametre motora MAN 175D sú uvedené v tabuľke Tab. 9.

Tab. 9 Základné parametre 12 valcovej verzie pohonnej jednotky MAN 175D; upravené podľa [91]

Typ motora	V12
Objem motora	62.4 l
Vrtnanie / zdvih	175 mm / 215 mm
Výkon	2220 kW
Vstrekovací systém	modular common-rail
Preplňovanie	turbodúchadlo MAN TCR12

10.4 MTU SÉRIE 4000

Ako už bolo spomenuté, pohonná jednotka MTU série 4000 (Obr. 18) bola ako prvá v tomto segmente vybavená systémom common-rail, podarilo sa to konštruktérom zo spoločnosti L'Orange. V roku 2016 oslávil tento agregát svoje 20 výročie [92]. Za tento čas boli realizované mnohé modernizácie, vďaka ktorým MTU série 4000 aj v súčasnosti patrí medzi najvýkonnejšie vznetrové pohonné jednotky vo svojej kategórii [92]. Táto pohonná jednotka sa využíva v širokom spektre dopravných prostriedkov a iných strojov [93]. Medzi najvýznamnejšie sektory využívajúce pohonné jednotky MTU série 4000 patria lodný priemysel, ťažobný priemysel a železničná doprava [94]. Rovnako ako takmer všetky agregáty tejto kategórie je aj séria 4000 vyrábaná v rôznych verziách. Ako základné rozdelenie môže byť považované rozdelenie podľa počtu valcov. Dostupné sú 8, 12, 16 a 20 valcové verzie, pričom konfigurácia valcov všetkých spomenutých je V [95]. MTU série 4000 využíva vstrekovací systém common-rail s dvomi spoločnými akumulátormi tlaku (pre každý rad valcov jeden) v kombinácii so samostatnými akumulátormi, ktoré sú zabudované v jednotlivých vstrekovačoch [10]. Ako aj predošlé agregáty aj jednotku MTU série 4000 je možné vybaviť palivový systém vysokotlakovým vedením s dvojitémi stenami z bezpečnostných dôvodov [95].



Obr. 18 Pohonná jednotka MTU série 4000; upravené podľa [96]

V roku 2007 spoločnosť predstavila vtedy novú verziu série 4000, ktorá dosahovala vstrekovací tlak 180 MPa. Jednotka v tej dobe využívala vstrekovače s označením 4000.03, v ktorých bol

po prvýkrát v histórii série 4000 integrovaný vlastný akumulátor tlaku. Tento vstrekovač je ovládaný elektromagneticky, a pri jeho konštrukcii bola snaha ovládací ventil umiestniť čo najbližšie ku vstrekovacej tryske, aby bolo docielené zníženie množstva paliva, ktoré je v pohybe počas vstrekovania. Vysokotlakové čerpadlá sú radovej konfigurácie, pričom tlakové elementy sú ovládané valčekovými zdvihátkami mazané olejom. [95]

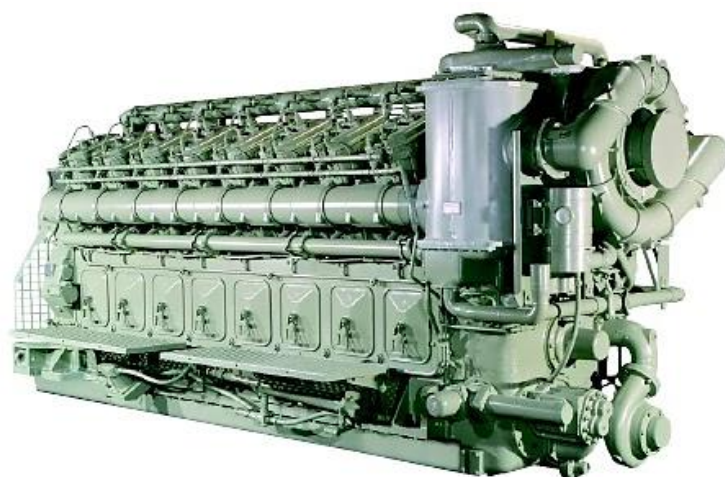
O novej verzii série 4000 zatiaľ nebolo zverejnených mnoho informácií týkajúcich sa vstrekovacieho systému, no informácie poskytnuté v dokumente [71] poukazujú na nový dizajn vstrekovača modelu 4000.03 a zvyšovanie vstrekovacieho tlaku na 220 MPa a plánované ďalšie navýšenie na hodnoty 250 MPa.

Tab. 10 Základné parametre pohonnej jednotky MTU 16V 4000 P63 určenej na výrobu elektrickej energie; upravené podľa [97]

Typ motora	V16
Objem motora	76,3 l
Vrtanie x zdvih	170 mm x 210 mm
Výkon	1800 - 2080 kW
Vstrekovací systém	common-rail s dvojitémi stenami palivového vedenia

10.5 GE (GENERAL ELECTRIC) 7FDL V16

Táto pohonná jednotka (Obr. 19) sa vyrábala medzi rokmi 1956 až 2004, ide teda o starší agregát. [98] V uvedených rokoch sa vyrábali rôzne verzie s konfiguráciami V8, V12 a V16, pričom ich primárne využitie je pohon lokomotív [15; 98]. Pôvodný mechanický systém vstrekovania verzie s výkonom 2982 kW bol nahradený systémom common-rail od spoločnosti Ganser [99]. Spoločnosť Ganser využila vstrekovače so špeciálnym tanierovým ventilom, ktorý zaisťuje veľmi rýchlu reakciu vstrekovača [99]. Systém vstrekovania pozostáva z vysokotlakového čerpadla, spoločného akumulátora a vstrekovačov, pričom každý rad valcov má vlastný akumulátor tlaku a vlastné čerpadlo [99].



Obr. 19 Pohonná jednotka GE 7FDL V16 [98]

Vstrekovače od spoločnosti Ganser majú zabudované akumulátory tlaku, čo v kombinácii so spoločným akumulátorom zaručuje čo najkonštantnejší tlak vo vysokotlakovom systéme [99]. Palivové čerpadlá sú poháňané priamo z vačkových hriadeľov [99]. Z uskutočneného merania, ktoré bolo vykonané pri nasledovných podmienkach: tlak 160 MPa, budiaci pulz 4 ms a počet vstrekov viac ako 1000, bol zistený rozdiel v množstve vstreknutého paliva medzi jednotlivými vstrekmami menej ako 1 % a to vďaka tanierovému ventilu [99]. Zároveň množstvo paliva, ktoré sa vrátilo späť do nádrže predstavovalo len 10 % množstva vstreknutého paliva, čo je podľa spoločnosti Ganser veľký úspech [99]. Aplikácia tanierového ventilu na túto pohonnú jednotku ukázala, že jeho funkcia nie je ovplyvnená fluktuáciami tlaku čo je veľmi výhodné hlavne pri vstrekaní malých objemov paliva [99]. Modernizácia systému vstrekovania paliva tohto agregátu priniesla množstvo výhod týkajúcich sa spotreby paliva a produkovaných emisií.

Tab. 11 Výhody systému common rail v porovnaní s mechanickým vstrekaním pohonnej jednotky GE 7FDL; upravené podľa [15]

Zníženie spotreby	6 – 7 % kombinovane
Zníženie produkcie čierneho dymu v celom spektre zaťaženia motora	50 – 90 %
Zníženie produkovaných emisií oxidov dusíka pri plnom zaťažení	20 – 30 %
Zníženie produkcie oxidu uhoľnatého pri plnom zaťažení	90 %

11 EMISIE PRODUKOVANÉ VZNETOVÝMI MOTORMI

Zloženie výfukových plynov vznetového motora je možné rozdeliť do niekoľkých základných skupín: uľovodíky, oxidy dusíka (NO_x), oxid uhoľnatý (CO) a pevné častice (PM) a oxid siričitý (SO_2). [100]

Oxid uhoľnatý vzniká ako produkt nedokonalého spaľovania, ak nedôjde k dokonalej oxidácii [100]. Jeho koncentrácia závisí najviac na bohatosti spaľovanej zmesi, takzvanom koeficiente λ [100]. Vznetové motory pracujú vo väčšine s chudobnou zmesou, takže formovanie oxidu uhoľnatého je v bežnej prevádzke minimálne [100]. Jeho koncentrácia vo výfukových plynach sa však môže zvyšovať v prípadoch, kedy zmes paliva a vzduchu nemá ideálny pomer. Ide napríklad o rýchlu akceleráciu či častý štart motora. Oxid uhoľnatý je obzvlášť nebezpečný ak je vznetový motor prevádzkovaný v uzavretom priestore, kedy môže dôjsť ku otrave týmto plynom [101]. Podobne ako oxid uhoľnatý, ktorý vzniká pri neoptimálnych podmienkach, vznikajú uľovodíky pri nedostatočne vysokých teplotách spaľovania [101]. Tieto nízke teploty sa vyskytujú primárne pri stenách valca, kde je teplota pri spaľovaní výrazne nižšia ako uprostred piesta, odkiaľ je zapálenie zmesi iniciované [100].

Oxidy dusíka vznikajú, ak je vo valci vysoká teplota a vysoký tlak [101]. Oxidy dusíka vznikajú zlúčením kyslíka a dusíka, čo sú plyny, ktoré sa vyskytujú prirodzene v atmosfére a do spaľovania sa dostávajú ako vzduch v sacom cykle motora. Za normálnych podmienok spolu tieto plyny nereagujú, no teploty, ktoré spaľovanie podporované systémom common-rail dosahuje, umožňujú týmto plynom spolu reagovať [100]. Produktami tejto reakcie sú NO a NO_2 pričom NO_2 je silne toxický a napomáha pri tvorbe smogu [100; 101]. Oxidy dusíka je v súčasnosti možné redukovať pomocou močoviny [102].

Oxid siričitý sa do spaľovacieho procesu dostáva prostredníctvom paliva, je toxický a prostredníctvom výfukových plynov sa dostáva do atmosféry, kde napomáha tvorbe kyslých dažďov [101]. V súčasnosti neexistuje systém, ktorý by dokázal odchytať oxid siričitý z výfukových plynov, a preto sa výrobcovia pohonných hmôt snažia minimalizovať obsah síry v palivách [100]. Za riešenie tohto problému je možné považovať aj využívanie biopalív či iných druhov alternatívnych palív ako napríklad syntetická nafta, ktoré síru neobsahujú takmer vôbec [25].

Pevné častice alebo PM vznikajú počas spaľovania aglomeráciou menších častíc čiastočne spáleného paliva, mazacieho oleja, sadzí z paliva a iných uľovodíkov [100]. Tieto častice je možné rozdeliť na tri skupiny: pevné častice (tvorené prevažne uhlíkom, takzvanými sadzami), SOF (ťažké uľovodíky, ktoré skondenzovali na časticiach uhlíka) a síranová frakcia [101]. Takto vzniknuté pevné častice majú guľatý tvar a priemer 15 nm až 40 nm [100]. Viditeľné sadze tvoria približne 50 % celkového zloženia emisii pevných častíc [100]. Pevné častice je možné z výfukových plynov pomerne efektívne odchytať pomocou filtra pevných častíc [103].

Systém vstrekovania paliva je jednou z najvýznamnejších premenných, ktoré vplývajú na zloženie výfukových splodín vznetových motorov. V porovnaní s mechanickým systémom vstrekovania paliva pracuje common-rail s vyššími vstrekovacími tlakmi a menšími vstrekovacími dýzami, čo má za následok lepšie a efektívnejšie rozprášenie paliva, čím sa docieli zvýšenie povrchu paliva, ktoré je v kontakte so vzduchom a nastáva efektívnejšia oxidácia [104]. Nastavenie vstrekovacích parametrov systému common-rail má preto výrazný vplyv na chod pohonnej jednotky a na zloženie produkovaných emisii. Na koncentráciu

jednotlivých druhov škodlivín však neovplyvujú len parametre vstrekovania, ako tlak a časovanie, ale aj to, či a ako je pohonná jednotka zaťažovaná [104]. Výrazný vplyv bol zaznamenaný hlavne v závislosti medzi vstrekovacím tlakom a produkciou oxidov dusíka.

Zo zvyšujúcim sa vstrekovacím tlakom totiž rastie koncentrácia oxidov dusíka vo výfukových plynach pri každom režime zaťaženia motora [104]. Z dôvodu znižovania produkcie pevných častíc je zaradený posedný interval vstrekovania paliva, ktorý nasleduje po hlavnom vstreku. Využitie tejto stratégie síce znižuje veľkosť produkovaných pevných častíc no zároveň zvyšuje koncentráciu oxidu uhoľnatého a celkovú koncentráciu uhlíkovodíkov. Ako možné riešenie sa ponúka kombinácia alternatívnych palív s rôznym časovaním vstrekovania [105]. Znižovanie koncentrácií nebezpečných látok vo výfukových plynach vznetových motorov je komplikovaná téma, keďže podmienky za ktorých prebieha spaľovanie sú ťažko kontrolovateľné a jednotlivé parametre ako vstrekovací tlak, spotreba, režim zaťaženia motora či okamih a trvanie jednotlivých vstrekov sú prepojené.

12 MOŽNÝ BUDÚCI VÝVOJ SYSTÉMU COMMON-RAIL PRE VEĽKÉ MOTORY

Výrazným znakom týchto systémov je snaha o ich modularitu a to hlavne z ekonomických dôvodov. Ak je totiž systém modulárny, čo znamená, že pozostáva z jednotlivých typizovaných častí, je možné ho prispôbiť na fungovanie v rôznych pohonných jednotkách od rôznych výrobcov a rôznych konfigurácií [106]. Klasický systém common-rail je vybavený zásobníkom tlaku, ktorý ma špecifické rozmery vyhovujúce oveľa užšej skupine motorov. Preto je možné očakávať, že v budúcnosti budú nasadené modulárne systémy do širšej škály motorov alebo prechod spoločností, ktoré tak doposiaľ neučinili, z klasického systému na modulárny.

V oblasti vstrekovacieho tlaku je možné predpokladať ešte mierny nárast, čo bolo dokázané v štúdií [9]. Ako už bolo spomenuté, so zvyšovaním vstrekovacieho tlaku je spojené množstvo výhod, ako napríklad vyššia termická účinnosť, čo má vo výsledku vplyv na spotrebu paliva. Schopnosť efektívne hospodáriť s palivom je jeden z najdôležitejších aspektov, ktorý vystupuje na stále zväčšujúcom sa trhu s pohonnými jednotkami, ktoré pracujú v dlhých časových úsekoch. Vlastnosť nízkej spotreby paliva je teda veľmi dôležitá v rámci konkurencieschopnosti každej spoločnosti vyrábajúcej pohonne jednotky. Možnosť vstrekať palivo v niekoľkých intervaloch počas jedného cyklu je jednou z najväčších výhod systému common-rail. V súčasnosti je medzi veľkými vznetrovými motormi možnosť vstrekať palivo v troch intervaloch štandard, no vstrekač LI2 od spoločnosti Liebherr je údajne schopný vstrekať palivo až v piatich intervaloch [59]. Táto schopnosť zlepšuje charakteristiky motora z hľadiska hlučnosti či množstva a druhu produkovaných emisií [4], preto je možné predpokladať, že spoločnosti sa budú usilovať v rámci konkurenčného boja vyrovnáť spoločnosti Liebherr a budú navyšovať maximálny počet vstrekov na jeden cyklus.

Stále sprísňujúce sa emisné normy sa prejavujú aj v sektore vozidiel a strojov pracujúcich mimo pozemných komunikácií, a preto sa výrobcovia pohonných jednotiek pre tieto stroje snažia o zníženie produkovaných emisií. Systém vstrekovania paliva je jedna z oblastí, prostredníctvom ktorej je možné zlepšiť efektivitu spaľovania či jeho priebeh. Toto má výrazný vplyv na emisie, ktoré sú motorom produkované. Preto je možné vidieť čoraz viac vznetrových pohonných jednotiek vybavených systémom common-rail. Je možné tvrdiť, že v budúcnosti nebude na vstrekovanie paliva pre veľké motory využívaný iný systém než systém common-rail. V súčasnosti mnoho spoločností ponúka takzvaný „dual-fuel“ common-rail systém. Ide teda o systém common-rail, ktorý využíva dva druhy palív. Spoločnosť Bosch vyvinula systém „dual-fuel“, ktorý vstrekuje klasickú naftu v kombinácii s LNG alebo CNG [107]. Využitie tohto systému sľubuje zníženie emisií oxidov dusíka a pevných častíc [107]. Ako už bolo spomenuté, biopalivá údajne tiež prispievajú k znižovaniu produkovaných emisií [108]. Celosvetovo pôsobiace spoločnosti sa usilujú o zníženie produkovaných emisií kvôli stále sprísňujúcej sa legislatíve. Z tohto dôvodu je možné očakávať vývoj systému common-rail v oblasti lepšej adaptácie na biopalivá a iné alternatívne palivá či kombinovanie tohto systému so vstrekaním plynného paliva.

ZÁVER

Systém vstrekovania paliva common-rail prešiel rokmi vývoja a jeho adaptácia na aplikáciu vo veľkých motoroch nie je jednoduchá úloha. Je nutné sa vysporiadať s rôznymi výzvami, ako je napríklad vysoký prietok paliva, vysoké rýchlosti uzatvárania vstrekovacích ventilov, čo sú hlavné dôvody vzniku a šírenia hydraulického rázu, ktorý ovplyvňuje vstrekovacie parametre ostatných vstrekovačov. Ďalším problémom systému common-rail vo veľkých motoroch je potreba filtrácie veľkého množstva paliva, ktoré je často znečistené pevnými časticami či vodou. Moderný palivový systém vznetovej pohonnej jednotky by tiež mal byť pripravený na prácu s biopalivami a inými druhmi alternatívnych palív. Pri vysokých vstrekovacích tlakoch, s ktorými najmodernejšie vznetové pohonné jednotky nepochybne pracujú a vysokých hodnotách prietoku paliva, vzniká najmä vo vstrekovačoch problém predčasného opotrebenia spôsobeného kavitáciou. Problémy spojené s prevádzkou systému common-rail riešia v súčasnosti spoločnosti, ktoré sa špecializujú na vývoj vstrekovacích systémov. Tímy inžinierov týchto spoločností doposiaľ predstavili niekoľko možných riešení. V prípade fluktuácií ide o zásobníky tlaku integrované vo vstrekovačoch, problém filtrácie paliva je riešený jednak robustnosťou komponentov systému a ďalej kombinovanými filtračnými vložkami. Voda, ktorá je zachytená v palive, je separovaná odlučovačmi vody, ktoré sú súčasťou filtračného systému. Problém vznikajúcej kavitácie je o niečo komplikovanejší. Vo väčšine prípadov je riešením tohto problému zmena geometrie dýzy alebo iných komponentov, ktoré podliehajú kavitačnému poškodeniu. Zmena parametrov, ktoré vznik kavitácie spôsobujú, by ovplyvnila možnosti a vlastnosti systému vstrekovania ako celku. Systém vstrekovania paliva vznetových agregátov má veľký význam v súvislosti s produkciou škodlivín vo výfukových splodinách. Priebeh spaľovania nafty a produkty výslednej chemickej reakcie sú výrazne ovplyvnené efektivitou atomizácie paliva. Systém common-rail vďaka svojej flexibilitě vstrekovacích parametrov počas akéhokoľvek režimu zaťažovania agregátu zaistuje najvyššiu možnú efektivitu atomizácie. Vďaka flexibilitě tohto systému ponúka v porovnaní so staršími konceptami vstrekovacích systémov vyšší výkon a nižšiu spotrebu pri zachovaní dobrého manažmentu produkcie emisii. Táto skutočnosť poukazuje na fakt, že systém vstrekovania paliva common-rail je nevyhnutnosťou v sektore veľkých vznetových motorov.

POUŽITÉ INFORMAČNÉ ZDROJE

- [1] *Common rail diesel: WHAT IS COMMON RAIL DIESEL AND WHERE ARE FORD COMPONENT MANUFACTURING PRESSINGS FITTED?* Online. In: FORD ENGINEERING GROUP LTD. FORD A SPIROL Company. 2015. Dostupné z: <https://www.ford-engineering.com/case-study/common-rail-diesel>. [cit. 2024-05-17].
- [2] PERKINS ENGINES COMPANY LIMITED. *Diesel common rail direct injection (CRDI) and its benefits*. Online. PERKINS ENGINES COMPANY LIMITED. Perkins. © 2024. Dostupné z: https://www.perkins.com/en_GB/resources/useful-information/common-rail.html. [cit. 2024-05-17].
- [3] REIF, Konrad. *Diesel Engine Management*. Wiesbaden: Springer Vieweg, in Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. ISBN 9783658039806. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-658-03981-3>.
- [4] KAUFMAN, Doug. *Five Fuel Events That Happen In Common Rail Direct Injection*. Online. In: BABCOX MEDIA INC. Enginebuilder. 2015. Dostupné z: <https://www.enginebuildermag.com/2015/10/five-fuel-events-that-happen-in-common-rail-direct-injection/>. [cit. 2024-05-17].
- [5] *Measuring the return flow of diesel injectors*. Online. In: TiePie. © 2024. Dostupné z: <https://www.tiepie-automotive.com/en/articles/rfs400-measurement>. [cit. 2024-05-17].
- [6] CHIAVOLA, Ornella; FRATTINI, Edoardo; LANCIONE, Simone a PALMIERI, Fulvio. Operation Cycle of Diesel CR Injection Pump via Pressure Measurement in Piston Working Chamber. Online. *Energies*. 2021, roč. 14, č. 17. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en14175385>. [cit. 2023-12-29].
- [7] *Bosch Common Rail Fuel Injection System: Version 2.0**. Online. In: BOSCH LIMITED, AUTOMOTIVE AFTERMARKET. BOSCH. December 2019. Dostupné 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. [cit. 2024-05-17].
- [8] JANKOWSKI, Antoni a KOWALSKI, Mirosław. ENVIRONMENTAL POLLUTION CAUSED BY A DIRECT INJECTION ENGINE. Online. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*. 2015, roč. 22, č. 4, s. 133-138. ISSN 1231-4005. Dostupné z: <https://doi.org/10.5604/12314005.1168461>. [cit. 2023-12-28].
- [9] ZHAO, Jianhui; GREKHOV, Leonid a YUE, Pengfei. Limit of Fuel Injection Rate in the Common Rail System under Ultra-High Pressures. Online. *International Journal of Automotive Technology*. 2020, roč. 21, č. 3, s. 649-656. ISSN 1229-9138. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12239-020-0062-3>. [cit. 2024-03-07].

- [10] KECH, Johannes. *HOW DOES COMMON RAIL INJECTION WORK?* Online. In: ROLLS-ROYCE PLC. Mtu. 2014. Dostupné z: <https://www.mtu-solutions.com/au/en/stories/technology/research-development/how-does-common-rail-injection-work.html>. [cit. 2024-03-07].
- [11] ZHANG, Zhao; LIU, Haifeng; YUE, Zongyu; WU, Yangyi; KONG, Xiangen et al. Effects of Multiple Injection Strategies on Heavy-Duty Diesel Energy Distributions and Emissions Under High Peak Combustion Pressures. Online. *Frontiers in Energy Research*. 2022, roč. 10. ISSN 2296-598X. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.857077>. [cit. 2024-04-26].
- [12] ZHANG, Zhiqiang; ZHAO, Fuquan; DENG, Jun; LI, Li-guang a SHEN, Yuan. Characteristics of the Multiple Injection Diesel Spray Employed Common Rail System. Online. *Journal of Thermal Science and Technology*. 2013, roč. 8, č. 1, s. 106-119. ISSN 1880-5566. Dostupné z: <https://doi.org/10.1299/jtst.8.106>. [cit. 2024-04-26].
- [13] ALBAYRAK, Arda; GEZER, Onur; ÖZENER, Orkun; BÜYÜK, Cihan a ÖZKAN, Muammer. The effect of multiple injection on CI engine pollutant emissions and green house gases. Online. *Fuel*. 2023, roč. 349. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128667>. [cit. 2024-04-26].
- [14] LI, Pimao; ZHANG, Youtong; LI, Tieshuan a XIE, Lizhe. Elimination of fuel pressure fluctuation and multi-injection fuel mass deviation of high pressure common-rail fuel injection system. Online. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2015, roč. 28, č. 2, s. 294-306. ISSN 1000-9345. Dostupné z: <https://doi.org/10.3901/CJME.2014.1216.180>. [cit. 2024-04-25].
- [15] GANSER CRS AG. *Common Rail Systems*. Online. GANSER CRS AG. GANSER COMMON RAIL SYSTEMS. Dostupné z: <https://www.ganser-crs.ch/products/common-rail-systems/>. [cit. 2024-04-18].
- [16] PAI, Srinath; SHARIEF, Abdul; KUMAR, Shiva a B, Sreeprakash. HIGH INJECTION PRESSURE IMPACT ON A DIRECT INJECTION DIESEL ENGINE. Online. *International Journal on Applied Bio-Engineering*. 2014, roč. 8, č. 2, s. 9-14. ISSN 0973-9084. Dostupné z: <https://doi.org/10.18000/ijabeg.10122>. [cit. 2024-04-26].
- [17] HAO, Caifeng; LU, Zhen; FENG, Yizhuo; BAI, Honglin; WEN, Ming et al. Optimization of fuel/air mixing and combustion process in a heavy-duty diesel engine using fuel split device. Online. *Applied Thermal Engineering*. 2021, roč. 186. ISSN 13594311. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116458>. [cit. 2024-04-26].
- [18] DUAN, Lian; YUAN, Shou-qi; HU, Lin-feng; YANG, Wen-ming; YU, Jian-da et al. Injection performance and cavitation analysis of an advanced 250 MPa common rail diesel injector. Online. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016, roč. 93, s. 388-397. ISSN 00179310. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.028>. [cit. 2024-04-26].

- [19] MATSUMOTO, Shuichi; YAMADA, Koichi a DATE, Kenji. Concepts and Evolution of Injector for Common Rail System. Online. In: . 2012, -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2012-01-1753>. [cit. 2024-04-11].
- [20] GANSER, M. A. Common Rail Injectors for 2000 bar and Beyond. Online. In: . 2000. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0706>. [cit. 2024-04-13].
- [21] LÓPEZ, J Javier; DE LA GARZA, Oscar A; DE LA MORENA, Joaquin a MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S. Effects of cavitation in common-rail diesel nozzles on the mixing process. Online. *International Journal of Engine Research*. 2017, roč. 18, č. 10, s. 1017-1034. ISSN 1468-0874. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/1468087417697759>. [cit. 2024-04-26].
- [22] ROBERT BOSCH GMBH. *CRIN-LE injector for large engines*. Online. ROBERT BOSCH GMBH. BOSCH. © 2024. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/injectors/injector-for-large-engines/>. [cit. 2024-04-13].
- [23] MOON, Chi Young; MAGNOTTI, Gina M.; SFORZO, Brandon A.; TEKAWADE, Aniket; KASTENGREN, Alan L. et al. Experimental Investigation of Cavitation-Induced Erosion Using X-Ray Imaging and Tomography. Online. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2022, roč. 8. ISSN 2297-3079. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fmech.2022.869165>. [cit. 2024-04-26].
- [24] *What Are the Different Types of Diesel Fuel?: Diesel Fuel Has Many Uses for Transportation On- and Off-Road!*. Online. In: LG Jordan Oil & Gas Co. © 2024. Dostupné z: <https://www.lgjordanoil.com/types-of-diesel-fuel/>. [cit. 2024-04-27].
- [25] *What are the different types of diesel fuel?* Online. In: Bulk Fuel Australia. 2018. Dostupné z: <https://bulkfuel.com.au/news/what-are-the-different-types-of-diesel-fuel>. [cit. 2024-04-27].
- [26] SRB, Luboš. *Co je syntetická nafta, jak se vyrábí a jaká je její cena? Vše, co potřebujete vědět*. Online. In: Elektrickévozy. 2023. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/synteticka-nafta-cena-vyroba-prehled>. [cit. 2024-04-27].
- [27] HUNICZ, Jacek; KRZACZEK, Paweł; GĘCA, Michał; RYBAK, Arkadiusz a MIKULSKI, Maciej. Comparative study of combustion and emissions of diesel engine fuelled with FAME and HVO. Online. *Combustion Engines*. 2021, roč. 184, č. 1, s. 72-78. ISSN 2300-9896. Dostupné z: <https://doi.org/10.19206/CE-135066>. [cit. 2024-04-27].
- [28] ILIEV, Simeon. A Study of Effect of Biodiesel on the Performance and emissions of a Common-rail Diesel Engine. Online. In: *2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*. IEEE, 2020, s. 1-4. ISBN 978-1-7281-9439-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/BulEF51036.2020.9326068>. [cit. 2024-04-27].

- [29] *The Importance of Diesel Fuel in Mining*. Online. In: AXI INTERNATIONAL. © 2024. Dostupné z: <https://axi-international.com/mining/>. [cit. 2024-05-23].
- [30] *Common causes of fuel injector failures and how to avoid them*. Online. In: BOSCH. © 2021. Dostupné z: <https://www.choosetherightinjector.com/en/w/common-causes-of-fuel-injector-failures-and-how-to-avoid-them>. [cit. 2024-05-22].
- [31] *Solving Common Rail Diesel Problems*. Online. In: Cost Effective Maintenance. © 2017. Dostupné z: <https://costeffective.com.au/2017/03/05/solving-common-rail-diesel-problems/>. [cit. 2024-05-22].
- [32] THOMPSON, Jason. *Why Diesel Fuel Injectors Fail: How to Avoid it*. Online. In: MOTORTREND. 2012. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/features/1211dp-why-diesel-fuel-injectors-fail/>. [cit. 2024-05-22].
- [33] IORDACHE, R C; PETREA, N D a BUJOREANU, C. Wear's issues on high-pressure common rail pumps. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, roč. 724, č. 1. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/724/1/012021>. [cit. 2024-04-27].
- [34] LAMBERT, Christophe. Solving the Filtration Challenges for Diesel Fuel. Online. In: . 2004, -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2004-01-1451>. [cit. 2024-03-07].
- [35] *A Boat's Biggest Fuel Concern: Removing Water from Fuel Tank*. Online. In: CENTRE TANK SERVICES LTD. CENTRE TANK SERVICES. 2023. Dostupné z: <https://www.centretank.com/news/a-boats-biggest-fuel-concern-removing-water-from-fuel-tank>. [cit. 2024-04-27].
- [36] WANG, Jia; PONTING, Michael; ZHANG, Cong; OLAH, Andrew a BAER, Eric. Fuel filtration properties and mechanism of a novel fibrous filter produced by a melt-process. Online. *Journal of Membrane Science*. 2017, roč. 526, s. 229-241. ISSN 03767388. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.12.040>. [cit. 2024-03-07].
- [37] *Water is the Enemy of Diesel Engines*. Online. DONALDSON COMPANY, INC. Donaldson FILTRATION SOLUTIONS. © 2024. Dostupné z: <https://www.donaldson.com/en-us/bulk-fluid-storage/technical-articles/water-enemy-diesel-engines/>. [cit. 2024-04-27].
- [38] ENGINE MOBILE FILTRATION TEAM-PARKER. *Water- A diesel Engine's Worst Enemy*. Online. In: THOMAS AUTO INJECTION CENTRE LIMITED. Thomas Auto Injection Centre. © 2018-2023. Dostupné z: <https://thomasgroupltd.co.uk/water-a-diesel-engines-worst-enemy/>. [cit. 2024-04-27].
- [39] FREGOLENTE, Patricia Bogalhos Lucente; FREGOLENTE, Leonardo Vasconcelos a WOLF MACIEL, Maria Regina. Water Content in Biodiesel, Diesel, and Biodiesel–Diesel Blends. Online. *Journal of Chemical & Engineering Data*. 2012, roč. 57, č. 6,

- s. 1817-1821. ISSN 0021-9568. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/je300279c>. [cit. 2024-03-07].
- [40] *Fuel Water Separator*. Online. In: AURORA GENERATORS INC. Auroragenerators.com. 2020. Dostupné z: <https://www.auroragenerators.com/post/fuel-water-separator>. [cit. 2024-04-27].
- [41] *Fuel-Guard Decontaminator – how it works*. Online. In: FUEL GUARD. Fuel-guard. 2015. Dostupné z: https://www.fuel-guard.co.uk/media/attachment/file/m/a/marine_fgd_brochure_16_2.pdf. [cit. 2024-05-17].
- [42] BAI, Yun; CHEN, Zhaoyang; DOU, Wei; KONG, Xiangdong; YAO, Jing et al. Pressure Fluctuation Characteristics of High-Pressure Common Rail Fuel Injection System. Online. In: L. INAMBAO, Freddie (ed.). *Diesel Engines and Biodiesel Engines Technologies*. IntechOpen, 2022. ISBN 978-1-80355-786-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/intechopen.102624>. [cit. 2024-03-06].
- [43] SHEREMETA, R M. Researching hydraulic shock phenomenon in complex hydraulic manifolds. Online. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2023, roč. 1277, č. 1. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1277/1/012029>. [cit. 2024-03-06].
- [44] HUANG, Huimin; TIAN, Bingqi; GENG, Liping a JU, Yusheng. Study on the pressure fluctuation characteristics of the high-pressure common rail system with a distributor. Online. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022, roč. 2378, č. 1. ISSN 1742-6588. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2378/1/012028>. [cit. 2024-03-06].
- [45] HAO, Wang; DONGCHANG, Zhao; WANG, Lv; ABDUL AMIR, H.F. a KHIEW, P.S. Decoupling Analysis on Pressure Fluctuation and Needle Valve Response for High Pressure Common Rail Injector. Online. *MATEC Web of Conferences*. 2017, roč. 108. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201710804011>. [cit. 2024-04-24].
- [46] WEI, Yunpeng; FAN, Liyun; WU, Yuelin; GU, Yuanqi; XU, Jing et al. Research on transmission and coupling characteristics of multi-frequency pressure fluctuation of high pressure common rail fuel system. Online. *Fuel*. 2022, roč. 312. ISSN 00162361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122632>. [cit. 2024-04-24].
- [47] LI, Ruichuan; YUAN, Wentao; XU, Jikang; WANG, Lin; CHI, Feng et al. Study of the Optimization of Rail Pressure Characteristics in the High-Pressure Common Rail Injection System for Diesel Engines Based on the Response Surface Methodology. Online. *Processes*. 2023, roč. 11, č. 9. ISSN 2227-9717. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/pr11092626>. [cit. 2024-04-24].
- [48] BINGQI, Tian; LIYUN, Fan; XIUZHEN, Ma; HAYAT, Qaisar; YUN, Bai et al. Investigation of Main Injection Quantity Fluctuation due to Pilot Injection in High Pressure Common Rail Fuel Injection System. Online. *International Journal on Smart*

- Sensing and Intelligent Systems*. 2022, roč. 7, č. 2, s. 820-836. ISSN 1178-5608. Dostupné z: <https://doi.org/10.21307/ijssis-2017-683>. [cit. 2024-04-24].
- [49] URBAN, Ondřej. *Hydraulický ráz: Návod k laboratornímu cvičení*. Online. In: VUT, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, ODBOR FLUIDNÍHO INŽENÝRSTVÍ VIKTORA KAPLANA. Hydromechnika.cz. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1AbEIESl5vIROGci4WlJNW8o36ZNn56WH/view>. [cit. 2024-04-25].
- [50] ROBERT BOSCH GMBH. *High-pressure pump CP9*. Online. ROBERT BOSCH GMBH. BOSCH. © 2024. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/pumps/high-pressure-pump-cp9/>. [cit. 2024-04-13].
- [51] GANSER, Marco; MOSER, Ulrich a HAUGER, Lars. *New Common Rail Systems suited for Diesel Engines from 1 to 5 Megawatt: modeling simulations and hardware results*. Online. In: GANSER CRS AG. GANSER COMMON RAIL SYSTEMS. 2007. Dostupné z: <https://www.ganser-crs.ch/wp-content/uploads/2013/10/CIMAC-Paper-No.-70.pdf>. [cit. 2024-04-25].
- [52] WHAT ARE PIEZO DIESEL INJECTORS AND HOW DO THEY WORK? Online. SEALAND Turbo-Diesel Asia. © 2022. Dostupné z: <https://www.slturbodiesel.com/what-are-piezo-diesel-injectors-and-how-do-they-work/>. [cit. 2024-04-11].
- [53] CSERE, CSABA. *Piezo Fuel Injectors Explained: The Tower of Piezo: The smartest injectors you'll ever meet*. Online. In: CAR AND DRIVER. 2011. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/features/a15124816/tech-department-piezo-fuel-injectors-explained/>. [cit. 2024-04-11].
- [54] ZHOU, Yuhao; LI, Guoxiu; LI, Hongmeng; WU, Xiaojun a XU, Chunlong. Effects of Structure and System Parameters on Fuel Leakage Characteristics of Precision Coupling Components in Fuel Injector for Modern Diesel Engine. Online. In: . 2022, -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2022-01-5028>. [cit. 2024-04-12].
- [55] FERRARI, A.; MITTICA, A.; PAOLICELLI, F. a PIZZO, P. Hydraulic Characterization of Solenoid-actuated Injectors for Diesel Engine Common Rail Systems. Online. *Energy Procedia*. 2016, roč. 101, s. 878-885. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.111>. [cit. 2024-04-12].
- [56] KISS, Tibor a WOLVERTON, Marc Andrew. Analytical Comparison of 2 and 3 Way Digital Valves for Use on Direct Needle Control Fuel Injectors. Online. In: . 2004, -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2004-01-0032>. [cit. 2024-04-18].
- [57] TENG, Ho a MCCANDLESS, James C. Performance Analysis of Rail-Pressure Supply Pumps of Common-Rail Fuel Systems for Diesel Engines. Online. In: . 2005, -. Dostupné z: <https://doi.org/10.4271/2005-01-0909>. [cit. 2024-04-24].

- [58] LIEBHERR. *Common rail systems*. Online. LIEBHERR. Liebherr.com. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/int/products/components/injection-systems/common-rail-systems/common-rail-systems.html>. [cit. 2024-02-24].
- [59] LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. *Short description Common rail injector LI2*. Online. In: LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/aa2d0297-8c11-4c25-a003-234ad70334e4-3/liebherr-li2-common-rail-injector-short-description-en-web.pdf>. [cit. 2024-02-24].
- [60] LIEBHERR. *Common Rail injector LI3*. Online. In: LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/7b39a8c7-febe-4f1a-8a4a-c9afccda6e6f-2/liebherr-li3-common-rail-injector-short-description-en-web.pdf>. [cit. 2024-02-24].
- [61] LIEBHERR-COMPONENTS AG. *Short description Common rail high-pressure pump LP11.5/LP11.6*. Online. In: LIEBHERR. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/0de6e28b-2d0d-4c2b-9c2c-1c105b186fdf-2/liebherr-lp11.5-11.6-common-rail-high-pressure-pump-short-description-en-web.pdf>. [cit. 2024-04-13].
- [62] LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. *Common Rail high pressure pump LP11.5*. Online. LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/can/products/components/injection-systems/high-pressure-pumps/details/commonrailhighpressurepump115.html>. [cit. 2024-04-13].
- [63] LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. *Common Rail high pressure pump LP11.6*. Online. LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/usa/products/components/injection-systems/high-pressure-pumps/details/commonrailhighpressurepump116.html>. [cit. 2024-05-18].
- [64] ROBERT BOSCH GMBH. *Diesel Systems*. Online. ROBERT BOSCH GMBH. BOSCH. © 2019 – 2024. Dostupné z: <https://www.boschoffhighway.com/xc/en/product-portfolio/diesel-components>. [cit. 2024-04-13].
- [65] KENDLBACHER, Christoph; BLATTERER, Dieter a BERNHAUPT, Martin. *Advanced Injection Systems for Large Marine and Industrial Engines*. Online. *MTZ industrial*. 2015, roč. 5, č. 1, s. 42-49. ISSN 2194-8682. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40353-015-0509-6>. [cit. 2024-04-13].
- [66] ROBERT BOSCH GMBH. *Modular common-rail system for large engines (MCRS)*. Online. ROBERT BOSCH GMBH. BOSCH. © 2024. Dostupné z: <https://www.bosch->

- mobility.com/en/solutions/powertrain/diesel/modular-common-rail-system-ohw/. [cit. 2024-04-13].
- [67] *FUEL INJECTION EQUIPMENTS*. Online. Marine Power International FZC. © 2022. Dostupné z: <https://mpifzc.com/products/fuel-injection-equipments/>. [cit. 2024-04-17].
- [68] PLESS, Arnd. *NEW MILESTONE: L'ORANGE PRODUCES OVER ONE MILLION COMMON RAIL INJECTORS: L'Orange, the large engine injection systems specialist, has produced its one millionth injector*. Online. In: ROLLS-ROYCE PLC. Mtu. 2015. Dostupné z: https://www.mtu-solutions.com/na/en/pressreleases/2015/new_milestone_lorange_produces_over_one_million_common_rail_injectors.html. [cit. 2024-04-17].
- [69] JORACH, Rainer W. a DOPPLER, Hermann. Das Akkumulator-Common-Rail-Einspritzsystem für die MTU-Baureihe 8000 mit 1800 bar Systemdruck. Online. *MTZ - Motortechnische Zeitschrift*. 2000, roč. 61, č. 10, s. 640-642. ISSN 0024-8525. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF03227301>. [cit. 2024-04-17].
- [70] *L'Orange – Precise. Innovative. Leading.: Common-Rail Systems for Heavy Fuel Oil and Diesel*. Online. In: DirectINDUSTRY. © 2024. Dostupné z: https://pdf.directindustry.com/pdf/l-orange/common-rail-systems-heavy-fuel-oil-diesel/58172-500073-_2.html. [cit. 2024-04-17].
- [71] KECH, Johannes; WILLMANN, Michael; GORSE, Philippe a BOOG, Manuel. *Common Rail Fuel Injection: Key technology for clean and economical combustion*. Online. In: Mtu. August 2011. Dostupné z: https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/download/technical-articles/3100651_MTU_General_WhitePaper_CommonRail_2011.pdf/_jcr_content/renditions/original./3100651_MTU_General_WhitePaper_CommonRail_2011.pdf. [cit. 2024-04-17].
- [72] KURRECK, Martin; REMMELS, Werner; ECKSTEIN, Michael; BÜCHELER, Otto a WACHTER, Volker. The new generation of the MTU engine series 4000. Online. *MTZ worldwide*. 2007, roč. 68, č. 5, s. 11-14. ISSN 2192-9114. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF03226825>. [cit. 2024-04-17].
- [73] GANSER CRS AG. *Ganser CRS*. Online. GANSER CRS AG. GANSER COMMON RAIL SYSTEMS. Dostupné z: <https://www.ganser-crs.ch/ganser-crs/>. [cit. 2024-04-17].
- [74] GANSER CRS AG. *Injectors*. Online. GANSER CRS AG. GANSER COMMON RAIL SYSTEMS. Dostupné z: <https://www.ganser-crs.ch/products/common-rail-injectors/>. [cit. 2024-04-18].
- [75] GANSER CRS AG. *High Pressure Pumps*. Online. GANSER CRS AG. GANSER COMMON RAIL SYSTEMS. Dostupné z: <https://www.ganser-crs.ch/products/high-pressure-pumps/>. [cit. 2024-04-18].

- [76] *ODYSSEUS COMMON RAIL SYSTEMS: Complete Common Rail Solutions*. Online. In: HEINZMANN GMBH & CO. KG. HEINZMANN. Dostupné z: <https://www.heinzmann.com/en/diesel-engines/common-rail-systems>. [cit. 2024-04-18].
- [77] *ODYSSEUS: Complete Common Rail Solutions*. Online. In: HEINZMANN. 2018. Dostupné z: https://www.heinzmann.com/en/?option=com_jdownloads&task=download.send&id=246&catid=49. [cit. 2024-05-21].
- [78] LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. *D9816 Mining*. Online. LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/sgp/products/components/combustion-engines/diesel-engines/product-portfolio-diesel-engines/product-highlights/detail-page-d9816-mining.html>. [cit. 2024-04-27].
- [79] *D9816 engine for the mining industry*. Online. In: LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. [2022]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/external/products/products-assets/bcb8b714-2ea9-4ba7-b6d1-fcb2d0d13b45/D9816%20for%20the%20mining%20industry.pdf>. [cit. 2024-04-27].
- [80] *Common Rail Systems from Liebherr for Engines with up to Five Liters of Displacement per Cylinder*. Online. In: LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. 2014. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/nzl/latest-news/news-press-releases/detail/common-rail-systems-from-liebherr-for-engines-with-up-to-five-liters-of-displacement-per-cylinder.html>. [cit. 2024-04-27].
- [81] *Liebherr Components presents its state-of-the-art technology in the area of common rail fuel injection systems in Aachen (Germany)*. Online. In: LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. 2017. Dostupné z: [https://www.liebherr.com/en/nzl/latest-news/news-press-releases/detail/liebherr-components-presents-its-state-of-the-art-technology-in-the-area-of-common-rail-fuel-injection-systems-in-aachen-\(germany\)-news.html](https://www.liebherr.com/en/nzl/latest-news/news-press-releases/detail/liebherr-components-presents-its-state-of-the-art-technology-in-the-area-of-common-rail-fuel-injection-systems-in-aachen-(germany)-news.html). [cit. 2024-04-28].
- [82] *Common Rail Systems by Liebherr: High-Performance and Fuel-Efficient*. Online. In: LIEBHERR-INTERNATIONAL DEUTSCHLAND GMBH. LIEBHERR. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/shared/media/components/documents/einspritzsysteme/liebherr-common-rail-systems.pdf>. [cit. 2024-04-28].
- [83] CUMMINS INC. *QSK60 FOR MARINE*. Online. CUMMINS INC. Cummins. © 2024. Dostupné z: <https://www.social.cummins.com/engines/qs60?v=1236&application=Marine>. [cit. 2024-04-28].

- [84] *FUEL SYSTEM UPGRADES FOR YOUR QSK-60: Bulletin 5544479*. Online. In: CUMMINS INC. Cummins. 2019. Dostupné z: <https://mart.cummins.com/imagelibrary/data/assetfiles/0058735.pdf>. [cit. 2024-04-28].
- [85] *QSK60-G12: EPA Tier 2 / TA Luft Compliant*. Online. In: Cummins. 2022. Dostupné z: <https://mart.cummins.com/imagelibrary/data/assetfiles/0070618.pdf>. [cit. 2024-04-28].
- [86] CUMMINS INC. *FUEL SYSTEM UPGRADE FOR THE QSK60*. Online. CUMMINS INC. Cummins. © 2024. Dostupné z: <https://www.cummins.com/parts/promotions/qs60-fuel-system-upgrade>. [cit. 2024-04-28].
- [87] *Performance That Pays.: QSK60 Tier 4 Final For Mining Applications. 1875-2850 HP (1398-2125 kW). Bulletin 4087390*. Online. In: Direct INDUSTRY. 2015. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/cummins-inc/performance-that-pays-qs60-tier-4-final-mining-applications/28678-949142.html>. [cit. 2024-04-28].
- [88] *Performance That Pays: MCRS overview*. Online. In: Direct INDUSTRY. 2014. Dostupné z: <https://pdf.directindustry.com/pdf/cummins-inc/mcrs-overview/28678-897461.html>. [cit. 2024-04-28].
- [89] MAN ENERGY SOLUTIONS SE. *High-speed marine power with the MAN 175D*. Online. MAN ENERGY SOLUTIONS SE. MAN Energy Solutions. © 2024. Dostupné z: <https://www.man-es.com/marine/products/four-stroke-engines/man-175d>. [cit. 2024-04-28].
- [90] *MAN 175D: Project Guide – Marine Four-stroke high-speed diesel engine compliant with IMO Tier II / IMO Tier III*. Online. In: MAN ENERGY SOLUTIONS SE. MAN Energy Solutions. 2023. Dostupné z: https://man-es.com/applications/projectguides/4stroke/Propulsion/PG_P-II_175D.pdf. [cit. 2024-04-28].
- [91] LEHENBAUER, John. *MAN 175D; Technology Driven Compact Marine Engine: A High-Tech, High-Speed, Highly Efficient Engine for the High Seas*. Online. In: MOTORTREND. 2017. Dostupné z: <https://www.motortrend.com/features/1707-man-175d-technology-driven-compact-marine-engine/>. [cit. 2024-04-29].
- [92] BLENKEY, Nick. *Twenty years on, MTU Series 4000 is still a leader*. Online. In: SIMMONS-BOARDMAN PUBLISHING INC. MARINELOG. 2016. Dostupné z: <https://www.marinelog.com/news/twenty-years-on-mtu-series-4000-is-still-a-leader/>. [cit. 2024-05-17].
- [93] ROLLS-ROYCE PLC. *Applications overview*. Online. ROLLS-ROYCE PLC. Mtu. © 2024. Dostupné z: <https://www.mtu-solutions.com/cn/en/applications.html>. [cit. 2024-05-17].

- [94] ROLLS-ROYCE PLC. *Series 4000 – power in versatility*. Online. ROLLS-ROYCE PLC. Rolls-royce. © 2024. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/discover/2023/series-4000-power-in-versatility.aspx>. [cit. 2024-05-17].
- [95] KURRECK, Martin; REMMELS, Werner; ECKSTEIN, Michael; BÜCHELER, Otto a WACHTER, Volker. The new generation of the MTU engine series 4000. Online. *MTZ worldwide*. 2007, roč. 68, č. 5, s. 11-14. ISSN 2192-9114. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF03226825>. [cit. 2024-05-17].
- [96] ROLLS-ROYCE PLC. *Mtu SERIES 4000*. Online. ROLLS-ROYCE PLC. Mtu. ©2024. Dostupné z: <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/applications/naval-solutions-mtu-05102/marine-defense-solutions/engines/mtu-series-4000.html>. [cit. 2024-04-28].
- [97] *SERIES 4000: GenDrive engines for the Oil & Gas Industry*. Online. In: ROLLS-ROYCE PLC. Mtu. © 2024. Dostupné z: https://www.mtu-solutions.com/content/dam/mtu/products/commercial-marine/offshore-exploration---production/engines-and-gensets-for-power-generation/mtu-series-4000/3232511_OG_spec_4000-03.pdf/_jcr_content/renditions/original./3232511_OG_spec_4000-03.pdf. [cit. 2024-05-18].
- [98] TRAINS AND LOCOMOTIVES WIKI. *GE 7FDL Engine*. Online. Trains and locomotives wiki. Dostupné z: https://trains-and-locomotives.fandom.com/wiki/GE_7FDL_Engine. [cit. 2024-04-29].
- [99] ZIMMERMANN, Kilian; HAEFELI, Richard a GANSER, Marco. Engine Performances With Advanced Common Rail Injector Design. Online. In: *Volume 1: Large Bore Engines; Fuels; Advanced Combustion*. American Society of Mechanical Engineers, 2017, -. ISBN 978-0-7918-5831-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/ICEF2017-3531>. [cit. 2024-04-29].
- [100] REŞITOĞLU, İbrahim Aslan; ALTINIŞIK, Kemal a KESKIN, Ali. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. Online. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2015, roč. 17, č. 1, s. 15-27. ISSN 1618-954X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0793-9>. [cit. 2024-04-29].
- [101] NETT TECHNOLOGIES INC. *What Are Diesel Emissions?* Online. NETT TECHNOLOGIES INC. NETT technologies. © 2020. Dostupné z: <https://www.nettinc.com/information/emissions-faq/what-are-diesel-emissions>. [cit. 2024-04-29].
- [102] *What is Selective Catalytic Reduction?* Online. In: Engine Technology Forum. © 2024. Dostupné z: <https://enginetechnforum.org/selective-catalytic-reduction-scr>. [cit. 2024-05-22].

- [103] *EVERYTHING YOU NEED TO KNOW ABOUT DIESEL PARTICULATE FILTERS*. Online. In: UNIVERSAL TECHNICAL INSTITUTE. 2019. Dostupné z: <https://www.uti.edu/blog/diesel/diesel-particulate-filters>. [cit. 2024-05-22].
- [104] XU-GUANG, Tan; HAI-LANG, Sang; TAO, QIU; ZHI-QIANG, Fan a WEN-HUI, Yin. The Impact of Common Rail System's Control Parameters on the Performance of High-power Diesel. Online. *Energy Procedia*. 2012, roč. 16, s. 2067-2072. ISSN 18766102. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.314>. [cit. 2024-04-29].
- [105] FAYAD, Mohammed A.; AL-SALIHI, Hind A.; DHAHAD, Hayder A.; MOHAMMED, Farag M. a AL-OGIDI, Bashar R. Effect of post-injection and alternative fuels on combustion, emissions and soot nanoparticles characteristics in a common-rail direct injection diesel engine. Online. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. S. 1-15. ISSN 1556-7036. Dostupné z: <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1970292>. [cit. 2024-04-30].
- [106] *Common-rail fuel injection system*. Online. In: BOSCH Diesel Center. 2020. Dostupné z: <https://boschdieselcenter.hr/en/news-and-tips/common-rail-fuel-injection-system>. [cit. 2024-05-22].
- [107] ROBERT BOSCH GMBH. *Gas and dual-fuel injection systems for large systems*. Online. ROBERT BOSCH GMBH. BOSCH. © 2024. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/powertrain/gas/natural-gas-and-dual-fuel-injection-systems-ohw/>. [cit. 2024-04-29].
- [108] *Biodiesel Vehicle Emissions*. Online. U.S. Department of Energy. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/diesels-emissions>. [cit. 2024-04-29].

Zoznam Použitých Skratiek a Symbolov

CNG		compressed natural gas
CT		computed tomography
EGR		exhaust gas recirculation
GE		General Electric
LNG		liquefied natural gas
MCRS		modular common-rail system
MIQ		main injection quantity
MTU		Motoren und Turbinen Union
obr.		obrázok
PIQ		pilot injection quantity
PM		particulate matter
PMI		pilot-main interval
resp.		respektíve
SOF		solvent organic fraction
tab.		tabuľka
tzv.		takzvaný
g	[m·s ⁻²]	gravitačné zrýchlenie
Δp	[MPa]	zmena tlaku