



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav automobilů, spalovacích motorů
a kolejových vozidel

Experimentální a modelové možnosti popisu
vlastností vstřikovačů pro vznětové motory

Experimental and model description of diesel
fuel injectors behaviour

DIPLOMOVÁ PRÁCE
2021

Bc. David BLAŽEK

Studijní program: N0716A270001 Dopravní a transportní technika

Studijní obor: Spalovací motory

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Klír, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Blažek** Jméno: **David** Osobní číslo: **465379**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Dopravní a transportní technika**
Specializace: **Spalovací motory**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Experimentální a modelové možnosti popisu vlastností vstřikovačů pro vznětové motory

Název diplomové práce anglicky:

Experimental and model description of diesel fuel injectors behaviour

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s problematikou systémů pro dodávku paliva u moderních vznětových motorů, včetně možností experimentálního popisu jejich chování. Zaměřte se zejména na okolnosti, které souvisí s provozním opotřebením vstřikovačů. Na vybraném souboru vzorků, proveďte experimentální průzkum s využitím dostupného přístrojového vybavení. Získané poznatky vyhodnoťte a porovnejte, např. s využitím matematických modelů, s dostupnými informacemi.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Vojtěch Klír, Ph.D. ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **13.07.2022**

Platnost zadání diplomové práce:



Ing. Vojtěch Klír, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Oldřich Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použitých literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

27/04/22

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Anotační záznam

Jméno autora: Bc. David Blažek

Název práce: Experimentální a modelové možnosti popisu vlastností vstřikovačů pro vznětové motory

Anglický název: Experimental and model description of diesel fuel injectors behaviour

Rozsah práce:

- 82 stran
- 32 obrázků
- 7 tabulek

Akademický rok: 2021/2022

Ústav: 12 120 Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Studijní program: N0716A270001 Dopravní a transportní technika

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Klír, Ph.D.

Odborný konzultant: Ing. Marcel Diviš, Ph.D.

Klíčová slova: Vstřikovač, měřicí stolice, provozní opotřebení, Common-Rail, vznětový motor

Key words: Injector, test bench, operational wear, Common-Rail, diesel engine

Abstrakt

Tato práce se zabývá popisem provozního opotřebení vstřikovačů systému Common-Rail využívaných v současných vznětových motorech. Dále možnostmi využití měřicí vývojové stolice EFS, která je součástí vybavení laboratoře vstřikování CVUM ve VTP Rožtoky, k hodnocení provozního opotřebení vstřikovačů. Rešeršní část pojednává o vzniku škodlivin ve vznětových motorech a vývoji emisních norem, které vedly k intenzivnímu vývoji a vzniku systému Common-Rail. Na to navazuje jeho popis zaměřující se na vstřikovače a jejich provozní opotřebení. V praktické části bylo provedeno měření na vývojové stolici EFS. Pro měření byly vybírány vstřikovače z vozidel, u kterých byla diagnostikována závada na vstřikovacím systému. Z výsledků měření byl vyhodnocen stav provozního opotřebení a jeho vliv na chování motoru. Na závěr došlo k porovnání naměřených hodnot z vývojové stolice EFS a servisních stolic, které jsou v servisní praxi využívány pro hodnocení stavu vstřikovačů.

Abstract

This thesis deals with the description of the operational wear of Common-Rail system injectors used in current diesel engines. Furthermore, the possible usage of the EFS measuring development bench, which is part of the equipment of the injection laboratory CVUM at VTP Rožtoky, for assessing the operational wear of injectors is evaluated. The research part discusses the formation of pollutants in diesel engines and the development of emission standards that led to the intensive development and invention of the Common-Rail system. This is followed by its description focusing on the injectors and their operational wear. In the practical part, measurements were made on the EFS development bench. Injectors from vehicles that were diagnosed with a fault in the injection system were selected for measurement. The state of operational wear and its effect on the behaviour of the engine was evaluated from the measurement results. At the end, the results from the EFS development test bench and service test bench were compared. These benches are used in field practice to evaluate condition of injectors.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: “Experimentální a modelové možnosti popisu vlastností vstřikovačů pro vznětové motory” vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu zdrojů, jenž tvoří poslední kapitulu této práce.

V Praze dne: 13. 7. 2022

.....

David Blažek

Poděkování

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Vojtěchu Klírovi, Ph.D. za odborný dohled, konzultace, vedení a rady, které mi značně pomohly k vypracování této diplomové práce. Největší dík zde patří panu Ing. Marcelovi Divišovi, Ph.D., bez kterého by se měření na vývojové stolici nemohlo uskutečnit. Zároveň bych mu chtěl poděkovat za veškerý čas a rady, které mi v průběhu měření věnoval. Na závěr bych chtěl poděkovat svojí rodině za obětavost, trpělivost a obrovskou podporu ve studiu.

Obsah

1. Úvod a cíl práce.....	9
2. Historie vznětových motorů a jejich vstřikovacích systémů	10
3. Emise	12
3.1. Tvorba škodlivých emisí ve vznětovém motoru.....	12
3.2. Legislativa v oblasti snižování emisí	15
3.3. Zkušební jízdní cykly	16
3.4. Kontrola emisního chování v průběhu životnosti vozidla	17
3.5. Současný stav	17
4. Vstřikovací systém Common-Rail	18
4.1. Nízkotlaká část	19
4.2. Vysokotlaká část.....	19
4.3. Vstřikovače systému Common-Rail.....	21
4.4. Vstřikovač s elektromagnetickým ventilem.....	22
4.5. Příčiny poruch vstřikovačů.....	25
4.6. Projev poškozených vstřikovačů	27
5. Metodika měření vstřikovačů.....	30
5.1. Diagnostika vozidla pomocí univerzálního diagnostického přístroje.....	31
5.2. Testování vstřikovačů na servisních stolicích	32
5.3. Popis měřicí stolice EFS ITB 240 RC-V	33
5.4. Systém IFR (Instantaneous Mass Flowmeter).....	34
5.5. Vizualizační komora.....	35
6. Experimentální popis parametrů vstřikovače	36
6.1. Parametry společné pro oba typy stolic	36
6.2. Parametry měřené pouze vývojovou stolicí EFS ITB 240 RC-V	38
7. Průběh měření na stolici EFS ITB 240 RC-V (Testovací cyklus).....	41
8. Zpracování dat z měřicí stolice EFS ITB 240 RC-V	43
8.1. Program na zpracování dat ze stolice EFS.....	43
8.2. Soubor dat z vizualizační komory	44
8.3. Databáze vstřikovačů	46
9. Zhodnocení výsledků z měření vstřikovačů.....	47
9.1. Analýza vlivu přívodního potrubí na měřené hodnoty	47
9.2. Analýza vlivu řídicího signálu	50
9.3. Sada vstřikovačů 1	52
9.4. Sada vstřikovačů 2.....	56
9.5. Sada vstřikovačů 3.....	58
9.6. Ostatní testované vzorky vstřikovačů	61
10. Modelové možnosti popisu vstřikovače	62
10.2. Využití numerického modelu pro predikci opotřebení vstřikovače.....	63
10.3. Zhodnocení využití matematického modelu	64
11. Závěr	65
12. Použitá literatura	67



Seznam obrázků	70
Seznam tabulek	71
Seznam příloh.....	71
Použité zkratky a symboly	72

1. Úvod a cíl práce

Vznětový motor se od svého vzniku vyvinul z velkého stacionárního pomaloběžného motoru, který poháněl stroje v továrnách, do podoby malého rychloběžného motoru pohánějící osobní automobily. Současně s tím probíhal i vývoj vstřikovacích soustav. Ty se v průběhu minulého století vyvinuly od mechanicky řízených řadových vstřikovacích čerpadel přes rotační čerpadla až po elektronicky řízené vysokotlaké vstřikovací systémy.

Jedním z nich je vstřikovací systém Common-Rail. Ten s vývojem emisních norem získal u osobních aut se vznětovým motorem naprostou dominanci. Důvody, proč se tak stalo jsou uvedeny v této diplomové práci. Vstřikovací systém Common-Rail je u osobních automobilů schopen dosáhnout vstřikovacího tlaku paliva až 2000 baru. Pro rozprášení paliva do válce využívá vstřikovače, které jsou řízeny elektromagnetickým ventilem. Na vstřikovače jsou kladeny striktní požadavky na přesnost odměřování vstřikované dávky paliva. Vstřikovače musí být schopny zajistit vstřik dávky paliva o objemu od 1 mm³ až do 60 mm³. Pro dosažení požadovaných parametrů musí být vyrobeny s velmi přísnými výrobními tolerancemi. Příkladem je vůle ve vedení jehly vstřikovače, která se pohybuje v řádech jednotek mikronů. Zároveň vstřikovače pracují s velkou rychlostí zdvihu jehly, protože musí umožnit až několik vstřiků paliva během jednoho pracovního zdvihu motoru.

To vše dělá ze vstřikovače velmi komplexní součást. Jak bývá nepsaným pravidlem, čím je součást komplexnější, tím je pravděpodobnost vzniku poruchy větší. Vstřikovače systému Common-Rail jsou ve srovnání s přechozími vstřikovacími systémy více náchylné na vznik provozního opotřebení, tudíž i sebemenší vznik provozního opotřebení v průběhu životnosti vstřikovače má zásadní vliv na vstřikování, a tedy chování motoru.

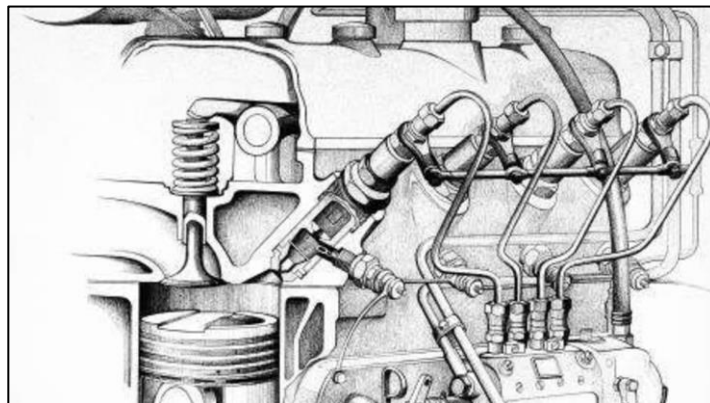
Hlavním cílem této diplomové práce je realizace experimentálního průzkumu na vstřikovačích, které vykazují provozní opotřebení. Měření bude sloužit k určení parametrů, dle kterých se dá hodnotit provozní opotřebení vstřikovače, a zároveň jejich vlivu na chování na chování motoru. Věnuje se i porovnání vývojové měřicí stolice EFS, která je součástí laboratoře vstřikování ve VTP Rostoky, se servisními stolicemi využívanými v praxi pro testování vstřikovačů. Pro získané výsledky se vytvoří databáze, která v budoucnosti přispěje k lepší diagnostice vad na vstřikovačích.

Při zajištění dostatku informací ohledně vstřikovačů a zároveň získání velkého objemu testovaných vzorků k statistickému vyhodnocení, bude snaha o implementaci poznatků z experimentu do matematických simulací.

2. Historie vznětových motorů a jejich vstříkovacích systémů

První vznětový motor byl zkonstruován roku 1897 pod vedením německého vynálezce Rudolfa Diesela ve spolupráci se společností Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg (MAN). Motor dosahoval na tehdejší dobu obdivuhodného výkonu 20kW při 175 min⁻¹. Vstříkovací systém využíval kompresor, který vefukoval palivo do spalovacího prostoru pod tlakem 30 barů. Jako palivo byl použit Kerosin. Motor dosahoval celkové účinnosti až 26,2 %, což byl v porovnání s parním strojem pohybujícím se kolem 10 % signifikantní rozdíl. Vzhledem k jeho rozměrům a parametrům se z počátku využíval v lodní dopravě a u stacionárních zařízení. [1] [2]

S postupným rozšiřováním aplikací vznětového motoru začaly vznikat požadavky na inovaci vstříkovacích soustav, jelikož původní technologie nebyla schopna zajistit požadované parametry vstříkování paliva. Roku 1927 uvedl Robert Bosch do sériové výroby první řadové vstříkovací čerpadlo. Tento technologický posun ve výrobě umožnil realizaci koncepcí rychloběžných motorů a vznětové motory se začaly objevovat v silničních aplikacích. Prvním sériově vyráběným osobním automobilem se vznětovým motorem byl vůz značky Mercedes-Benz typ 260D v roce 1936 (2,6 l, 50 HP). Konstrukční uspořádání motoru lze vidět na Obr.1. [1]



Obr. 1. Konstrukce prvního sériově vyráběného vznětového motoru[1]

Vznětové motory našly své primární uplatnění v oblasti užitkových vozidel, kde byly upozaděny jejich nevýhody, tedy hlučný chod či nižší měrný výkon, a zvítězily přednosti, kterými byly nízká spotřeba paliva a vysoký točivý moment. U osobních automobilů došlo k rozmachu vznětových motorů až koncem 90. let dvacátého století. V roce 1992 vznikla

dohoda mezi ACEA (European Automobile Manufacturers Association) a Evropskou komisí o snižování emisí CO₂ (tzv. Euro normy), čímž byly evropské automobilky postaveny před nutností snižování spotřeby a emisí u osobních automobilů. Vznětové motory se tak vzhledem ke své spotřebě paliva rázem staly středobodem jejich zájmu.

Rozmachu vznětových motorů pomohl také rozvoj vstřikovacích zařízení, která za využití elektronických prvků umožňujících odměření a přesné načasování vstřikovací dávky vytvářejí tlaky přes 100 MPa. Od roku 1992 do roku 1998 postupně vznikly vstřikovací systémy, jakými jsou Sdružená vstřikovací jednotka (UIS), Sdružený vstřikovací systém (UPS) nebo vstřikovací systém Common-Rail (CR), které využívají současné vznětové motory. Dalším důležitým aspektem, který přispěl k rozšíření vznětových motorů, byl vývoj přeplňování, umožňujícího vznětovým motorům výkonově konkurovat zážehovým motorům.

Vznětový motor přestal být typický svým hlučným projevem a nízkým výkonem, čímž se stal velkou konkurencí zážehovému motoru. Lze tedy konstatovat, že v návaznosti na postupnou inovaci vznětových motorů dochází začátkem roku 2000 k tzv. „Diesel boomu“. Ten vrcholí v roce 2015, kdy nově prodané osobní automobily se vznětovými motory tvořily 47 % trhu.

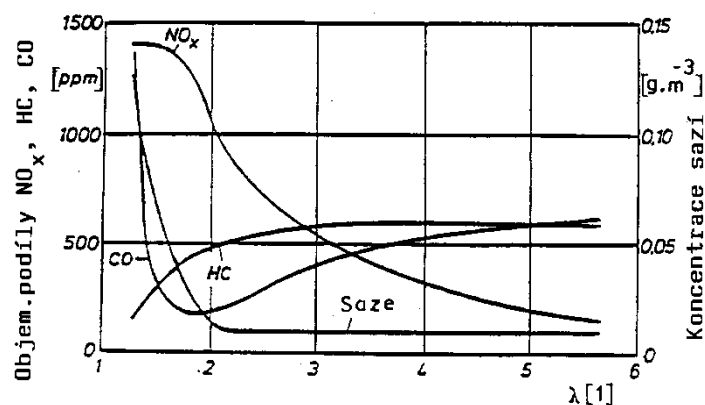
Po roce 2015 však stále se zpřísnující emisní normy, a také značně medializovaná aféra „Dieselgate“ způsobily významný propad prodeje osobních automobilů se vznětovým motorem. S ohledem na aktuální environmentální nastavení společnosti a s tím související intenzivní politický tlak na bezemisní pohony upouští stále více automobilek od investic do inovací vznětových motorů a souvisejících systémů a zaměřuje se především na rozvoj elektromobility. [3]

3. Emise

Emise jsou škodlivé látky, které vznikají nedokonalým spalováním uhlovodíkových paliv ve spalovacích motorech. Tyto látky mají přímý negativní vliv na zdraví člověka a způsobují rovněž změnu klimatu Země. Následující kapitola se zabývá mechanismy tvorby škodlivin ve vznětových motorech, legislativou týkající se redukce škodlivin a testovacími jízdami cykly, které slouží k hodnocení produkovaných emisí.

3.1. Tvorba škodlivých emisí ve vznětovém motoru

Produkty spalování ve vznětových motorech jsou obdobné jako u zážehových spalovacích motorů, a to vzhledem ke spalování chemicky podobného uhlovodíkového paliva. Co se však liší, to je koncentrace jednotlivých složek ve výfukových plynech. Důvodem je odlišná tvorba směsi paliva se vzduchem. Vznětové motory také pracují s větším přebytkem vzduchu ($\lambda=1,4-4,5$), což má přímý vliv na podíl škodlivin ve spalinách. Primárními emisemi vznikajícími při spalování ve vznětových motorech jsou oxid uhelnatý (CO), oxidy dusíku (NO_x), nespálené uhlovodíky (HC), saze a oxid uhličitý (CO_2). Podrobněji rozpracovány budou v následujících podkapitolách. [5]



Obr. 2. Vliv přebytku vzduchu na podíl škodliviny ve spalinách[6]

3.1.1. Oxid uhelnatý (CO)

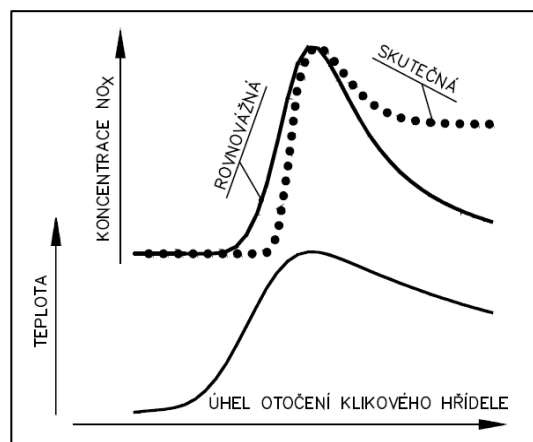
Tento bezbarvý jedovatý plyn vzniká jako produkt nedokonalé oxidace uhlíku v uhlovodíkovém palivu. Oproti zážehovému motoru je však koncentrace CO u vznětového motoru výrazně nižší, a to vzhledem k vyšším hodnotám součinitele přebytku vzduchu.

Jak je demonstrováno na Obr. 2, zvyšuje se objemový podíl CO s rostoucím součinitelem přebytku vzduchu, což je dáno vlivem reakčně-kinetického mechanismu. Se stoupajícím přebytkem vzduchu klesá zatížení motoru. Způsobí to pokles teploty, jehož vlivem klesá také reakční rychlost, a CO nestačí zoxidovat na CO₂. Ke zvyšování objemového podílu CO dochází také při spalování směsi se součinitelem přebytku vzduchu nižším než 1,5, kdy se výrazně projevuje nehomogenita směsi uvnitř spalovacího prostoru.

Jedovatost oxidu uhelnatého spočívá v jeho snadnějším navázání na krevní barvivo na úkor kyslíku, čímž způsobuje nedostatečné okysličování orgánů.[5]

3.1.2. Oxidy dusíku (NO_x)

Tyto sloučeniny vznikají vysokoteplotní oxidací dusíku obsaženého ve vzduchu nasávaného do válce motoru. Oxidace dusíku je endotermickou reakcí, kterou přírodní síly vzdorují dalšímu zvyšování teplot. S rostoucí teplotou ve spalovacím prostoru dochází



Obr. 3. Ilustrace tvorby NO ve válci motoru[7]

k rozpadu atomárního dusíku a reakci s kyslíkem, což vede ke zvyšování rovnovážné koncentrace NO. Po dosažení horní úvratí dochází k expanzi a následnému poklesu teplot ve válci. Vlivem rapidního snížení teploty se snižuje reakční rychlost dekompozice NO natolik, že dochází k tzv. zmrazení koncentrace. Hodnota NO je tedy vyšší, než ta, která by odpovídala rovnovážné koncentraci pro určitou teplotu spalin. To je názorně vidět v grafu na Obr. 3. Koncentrace NO ve spalinách s rostoucím součinitelem přebytku vzduchu klesá. Dalším vlivem snižujícím tvorbu oxidů dusíku je pilotní dávka paliva, kdy dochází ke

zkrácení průtahu vznětu a nepřichází tak rapidní nárůst tlaku a teplot. Oxidy dusíku se významně podílejí na tvorbě tzv. letního smogu. [7]

Z pohledu dopadu na lidské zdraví je z oxidů dusíku největší hrozbou pro náš organismus oxid dusičitý, který při vyšší koncentraci dráždí dýchací cesty, neboť reaguje na sliznicích a vytváří kyselinu dusičitou. Tělo se jí brání stejně jako kouří a přivírá přísun vzduchu do plic, jehož důsledkem je pocit dušení a nucení ke kašli. Oxid dusičitý vzniká oxidací oxidu dusného v atmosféře.

3.1.3. Nespálené uhlovodíky

Jedná se o látky, které vznikají nedokonalým spalováním paliva. Důvody geneze nespálených uhlovodíků mohou být příliš chudá směs, nedostatečně rozvířená směs, dopad paliva na studenou stěnu nebo odpaření paliva z objemu pod tryskou vstřikovače.

Vzhledem k tomu, že palivo obsahuje různé uhlovodíky, mají tyto jednotlivé složky rozličné vlivy na zdraví člověka. Počínaje nezávadnými složkami, jako jsou alkany a alkeny, přes aldehydy, které mají dráždivé účinky na sliznice a oči, až po polycyklické aromatické uhlovodíky, které jsou karcinogenní. [7]

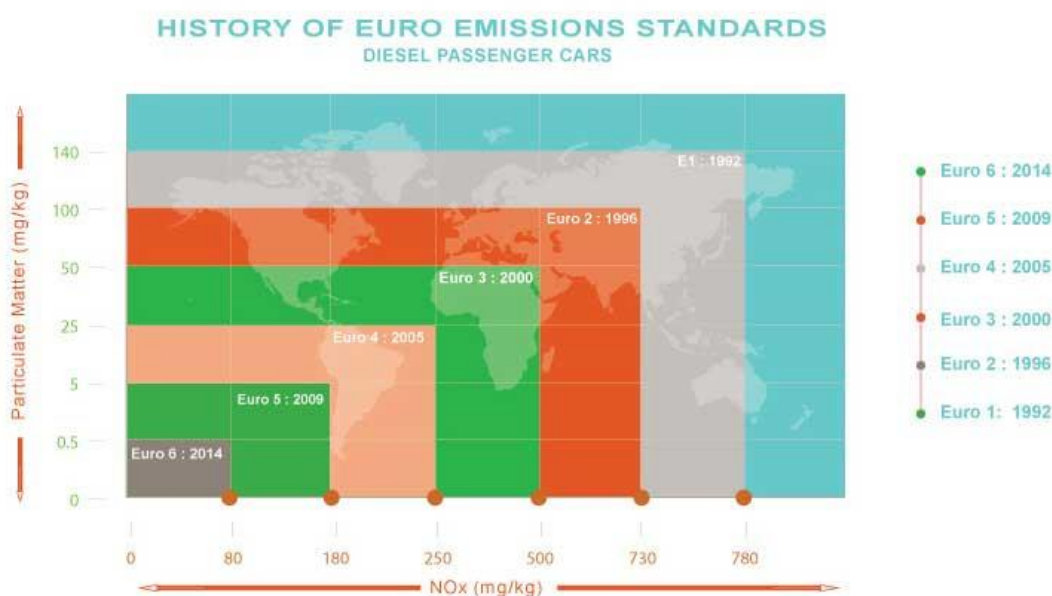
3.1.4. Pevné částice (Saze)

Pevný uhlík vzniká vysokoteplotní dekompozicí uhlovodíkových molekul za nepřístupu kyslíku. Vznětový motor je typický svým difuzním plamenem, ve kterém se uvnitř nachází zóna bez přístupu kyslíku, a tam se tvoří saze. Ty se pak dostávají dále do oblasti plamene, kde je dostatečný přísun kyslíku a spálí se. Pokud je ve spalovacím prostoru přebytečné množství paliva, nebo je palivo nedostatečně promícháno, vznikají tak bohaté oblasti, že v nich nedojde k okysličení a surové saze pokračují do výfukového potrubí. Se snižujícím se součinitelem přebytku vzduchu proto v oblasti velmi bohaté směsi dochází ke zvýšené tvorbě sazí. Takzvaná mez kouřivosti se strmým nárůstem tvorby sazí se pohybuje u vznětových motorů okolo hodnoty součinitele přebytku vzduchu $\lambda=1,3$.

Pevné částice, které obsahují převážně uhlík, nejsou samy o sobě toxické, ovšem absorbují do sebe látky zdraví nebezpečné, jako například polycyklické aromáty. Pevné částice jsou také hlavní příčinou zimního smogu viditelného při stavu teplotní inverze. [7]

3.2. Legislativa v oblasti snižování emisí

Jedním z hlavních témat v odvětví automobilového průmyslu je aktuálně problematika produkce skleníkových plynů a jiných škodlivin a jejich podíl na celkovém znečištění Země. Přestože se osobní automobilová doprava podílí na této produkci pouze z 15 % celkového množství vyprodukovaného CO₂, ocitá se v úzkém hledáčku veřejnosti a médií. Neucelenější právní úprava v oblasti snižování emisí je vydána Evropskou unií. Každý člověk se denně setká s osobním automobilem, ať už pasivně či aktivně za volantem. Také proto evropská legislativa ukládá výrobcům osobních automobilů přísné normy na limity škodlivin odcházející z výfukových systémů spalovacích motorů. Evropské automobilky musejí dodržovat a plnit dvě zásadní právní normy. První z nich je emisní norma Euro (European emission standards), která stanovuje limitní hodnoty škodlivin ve



Obr. 4. Vývoj emisních norem[8]

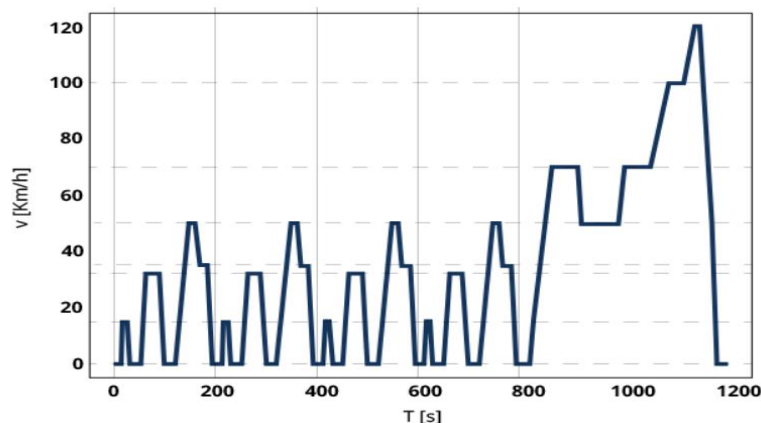
výfukových plynech vycházejících ze spalovacích motorů. Norma určuje limity pro oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky (HC), oxidy dusíku (NO_x) a pevné částice (PM). První Euro norma byla vydána v roce 1992 a vešla ve známost pod označením Euro 1. Další normy, které nabyly platnosti a účinnosti, nesou totožné označení, avšak se zvyšujícím se číslováním. Od ledna 2021 až po současnost je v platnosti norma Euro 6d. Z Obr. 4., týkající vývoje emisních norem, je patrné, jak postupně docházelo k rapidnímu zpříšňování limitů škodlivin ve výfukových plynech. Euro normy přispěly i k tomu, že v současné době skoro nepozorujeme zvýšenou kouřivost u osobních automobilů, jejíž vinou byly ulice větších měst zahaleny ve smogu, což je z pohledu ekologie bezesporu

velký krok vpřed. Avšak v posledním roce se hodně diskutuje o normě Euro 7, která by mohla být schválena v dohledné době s platností od roku 2025. Zatím se neví, její finální znění, ale s ohledem na prozatím dostupné informace je dost dobře možné, že pro spalovací motory – tak jak je známe – bude likvidační. [9]

Co se týká produkce oxidu uhličitého (CO₂), tu neregulují Euro normy, ale nastavuje ji nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/ 631, kterým se musí výrobci automobilů v Evropě taktéž řídit. Toto nařízení stanovuje průměrný limit 90 g CO₂/km pro nově vyrobené osobní automobily.

3.3. Zkušební jízdní cykly

Ke stanovení spotřeby vozidla, a tedy množství produkovaného CO₂ a dalších škodlivin se používaly a používají standardizované procedury v podobě testovacích jízdních cyklů. Test probíhá na válcové zkušebně. Kola vozidla jsou umístěna na pohyblivé válce připojené k dynamometru. Dynamometr je zařízení, které dokáže simulovat jízdní odpory. Aby výsledky testovacích jízdních cyklů co nejvíce odpovídaly reálnému provozu vozidla, je nutné nastavit dynamometr na příslušnou hmotnost vozidla tak, aby byla napodobena reálná setrvačnost vozidla. Během testu je k automobilu připevněna aparatura pro analýzu výfukových plynů. Cílem testovacích jízdních cyklů je představa chování vozidla v reálném provozu. Bere v úvahu různé situace v silničním provozu, při



Obr. 5. Jízdní cyklus WLTP[11]

kterých dochází ke zrychlování, zpomalování i zastavení vozidla. Od roku 1997 do roku 2017 byl používán jízdní cyklus NEDC (New European Driving Cycle). V současnosti však už z důvodu nízké průměrné rychlosti jízdy nesplňuje jízdní styl, a tak nemá patřičnou výpovědní hodnotu. Od roku 2018 proto vešla v platnost testovací procedura WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures), která se skládá

WLTC (World Harmonized Light Vehicle Duty Test Cycle) a RDE (Real Driving Emission). WLTC se stejně jako NEDC provádí na válcové zkušebně. WLTC oproti NEDC více odpovídá reálnému silničnímu provozu, agresivnějšími zrychleními a vyššími rychlostmi. K testu na válcové zkušebně dále přibyl test RDE, kdy je vozidlo testováno v reálném silničním provozu. [9][11]

3.4. Kontrola emisního chování v průběhu životnosti vozidla

Oproti náročným homologačním procedurám, při kterých jsou měřeny všechny složky škodlivin ve výfukových plynech, je kontrola emisí u ojetých vozidel se vznětovým motorem omezena pouze na měření kouřivosti motoru. Probíhá na stanici měření emisí v rámci technické kontroly vozidla, jejíž interval je u vozidel starších čtyř let stanoven zákonem na každé dva roky. Používanou metodou je měření kouřivosti volnou akcelerací. Akcelerační pedál se sešlápne do maximální polohy a setrvává v této poloze, dokud se nedosáhne maximálních otáček, omezených omezovačem. Jakmile dojde k jejich dosažení, plynový pedál se uvolní. Výsledná hodnota kouřivosti je nevyšší zaznamenanou během akcelerace. Kouřivost motoru je vyjádřena součinitelem absorpce k [m^{-1}]. Zařízení, které se při měření využívá se nazývá opacimetr. Přílišná kouřivost je jedním z hlavních symptomů špatně fungujících vstřikovačů, proto je v mnoha případech závada na vstřikovacím systému odhalena až při měření emisí. [12]

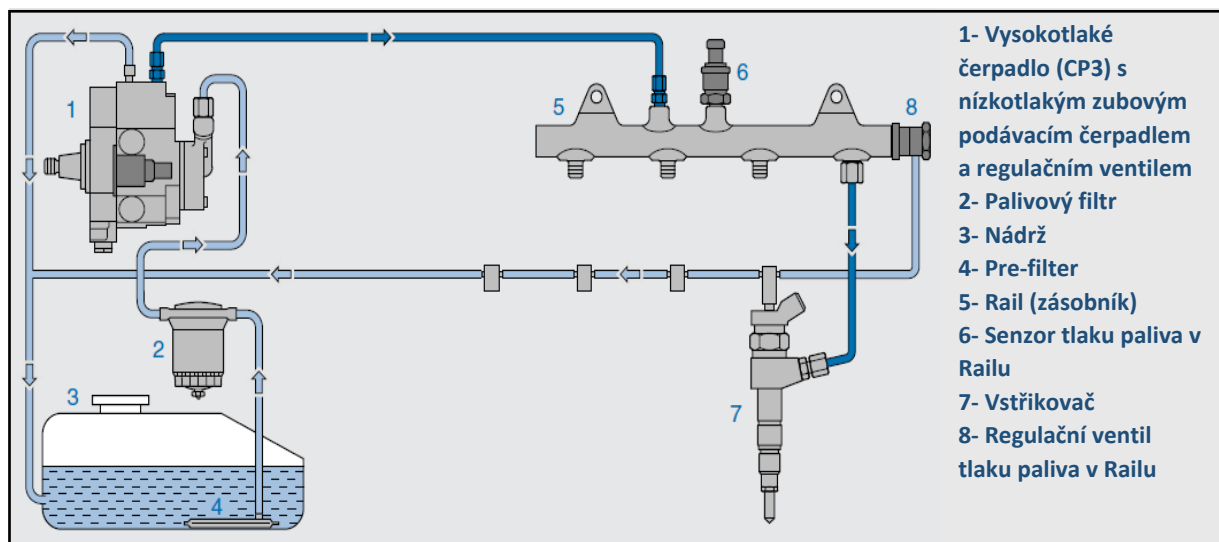
3.5. Současný stav

Vlivem stále se zpřísňujících emisních norem byla zapotřebí neustálá inovace v oblasti vstřikovacích soustav vznětových motorů. Mechanicky řízená řadová vstřikovací čerpadla a rotační vstřikovací čerpadla nahradily elektronicky řízené vstřikovací systémy, jako jsou Sdružená vstřikovací jednotka, Sdružený vstřikovací systém nebo vstřikovací systém Common-Rail. Dnes je v oblasti osobních automobilů naprostým vítězem systém Common-Rail. V současné době se systém vstřikování paliva CR nachází u všech nově vyrobených osobních automobilů se vznětovým motorem, které musí plnit aktuální evropské emisní normy. Důvody dominance systému CR a jeho popis jsou uvedeny v kapitole 4. Pro srovnání jsou v Příloze 1 popsány také vstřikovací systémy přecházející systému CR.

4. Vstřikovací systém Common-Rail

Název vstřikovacího systému je odvozen od použitého zásobníku tlaku, tzv. Railu. Jelikož je zásobník společný pro všechny vstřikovače, dostal tak systém název Common-Rail (CR), což rovněž vypovídá o jeho funkci.

Hlavním důvodem nahrazení ostatních vstřikovacích zařízení systémem CR je jeho přednost spočívající v nezávislosti časování dávky paliva a velikosti tlaku vstřikovaného paliva na otáčkách motoru. Ta dovoluje pro různé zatížení motoru řídit libovolně vstřikovací parametry, jakými jsou vstřikovací tlak, délka vstřikování a možnost zařazení pilotních a dodatečných vstřiků paliva. U osobních automobilů je CR schopen dosáhnout vstřikovacích tlaků až 200 MPa což zajišťuje lepší rozprášení paliva ve válci a snižuje



Obr. 6. Popis vstřikovacího systému Common-Rail [13]

produkcí emisních škodlivin.

Na Obr. 6 jsou popsány jednotlivé komponenty tohoto systému. CR lze rozdělit na nízkotlakou a vysokotlakou část. V nízkotlaké části je palivo pomocí nízkotlakého čerpadla dopravováno z palivové nádrže (3) přes palivový filtr se separátorem vody (2) do vysokotlakého čerpadla (1), kde je stlačeno na vysoký tlak. Dále je vysokotlakým potrubím dopravováno palivo o vysokém tlaku do zásobníku (5). V zásobníku tlaku je pomocí regulačního ventilu tlaku (8) udržován potřebný konstantní tlak paliva. Zásobník je vybaven senzorem tlaku paliva, který posílá informaci o aktuálním tlaku paliva do řídicí jednotky. Zásobník je propojen se vstřikovači krátkým vysokotlakým vedením, takže je tlak v zásobníku stejný jako tlak ve vstřikovačích. Systém CR využívá elektronicky řízené

vstřikovače a ke vstřiku paliva dochází ve chvíli, kdy je vstřikovačem obdržen elektrický signál vyslaný řídicí jednotkou. [13]

4.1. Nízkotlaká část

Úkolem nízkotlaké části je dopravit palivo bez nečistot do vysokotlakého čerpadla. Hlavní dvě komponenty nízkotlaké části jsou podávací čerpadlo a palivový filtr.

Podávací čerpadlo musí mít dostatečný výkon na vytvoření požadovaného průtoku a tlaku k dopravení paliva do vysokotlakého čerpadla. U osobních automobilů se využívají dva konstrukční typy: elektricky poháněné válečkové výstředníkové čerpadlo umístěné v nádrži, anebo mechanicky poháněné zubové čerpadlo, které je součástí vysokotlakého čerpadla.

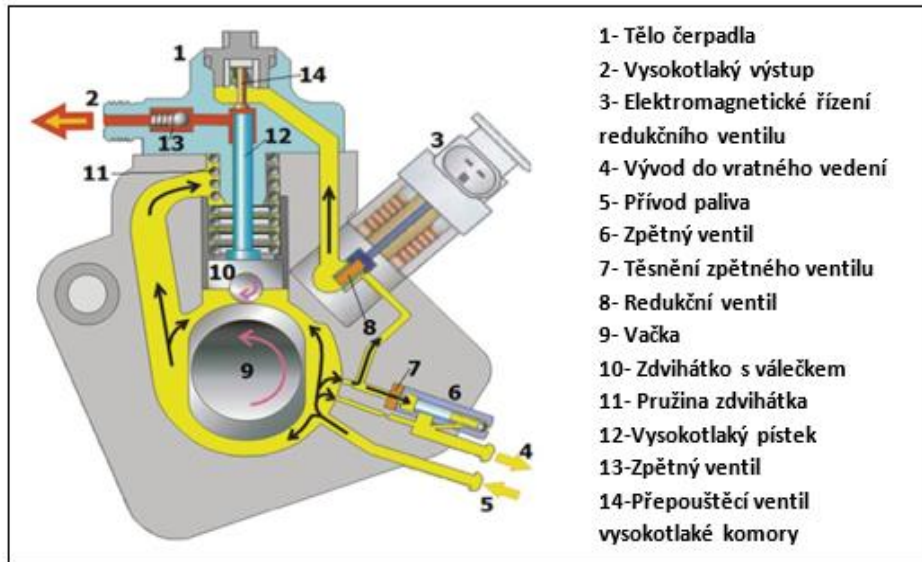
Další důležitou komponentou je palivový filtr se separátorem vody. Tolerance ve vedení pohyblivých částí vysokotlakého čerpadla a vstřikovačů jsou tak malé (0,002 mm), že jakákoliv větší nečistota v palivu může způsobit fatální poškození vysokotlakých součástí. Protože jsou současně mazány palivem, je důležité ve filtru odseparovat vodu z paliva, která by snížila jeho mazací schopnost. Je důležité dodržovat pravidelné servisní intervaly pro výměnu filtru, protože provozem dochází k zanášení filtru a mohlo by dojít k nedostatečnému průtoku paliva do vysokotlakého čerpadla. Do nízkotlaké části lze zahrnout také zpětné vedení paliva od vstřikovačů a vysokotlakého čerpadla zpět do nádrže. Palivo se do ní vrací přes chladič paliva, protože stlačení způsobilo nárůst jeho teploty. Aby nedocházelo k růstu teploty paliva, je zapotřebí vracející se palivo chladit. [13]

4.2. Vysokotlaká část

4.2.1. Vysokotlaké čerpadlo

Hlavní funkce vysokotlakého čerpadla spočívá v dodávce dostatečného množství paliva pod vysokým tlakem do zásobníku pro každý provozní režim motoru (zatížení, otáčky). Čerpadlo neustále stlačuje palivo, které je poté dopraveno vysokotlakým potrubím do zásobníku nezávisle na vstřikování. Novější vysokotlaká čerpadla jsou vybavena regulačním ventilem, který redukuje průtok paliva čerpadlem, aby nedocházelo ke zbytečnému stlačování paliva při režimech motoru, kde to není zapotřebí. Tím se sníží

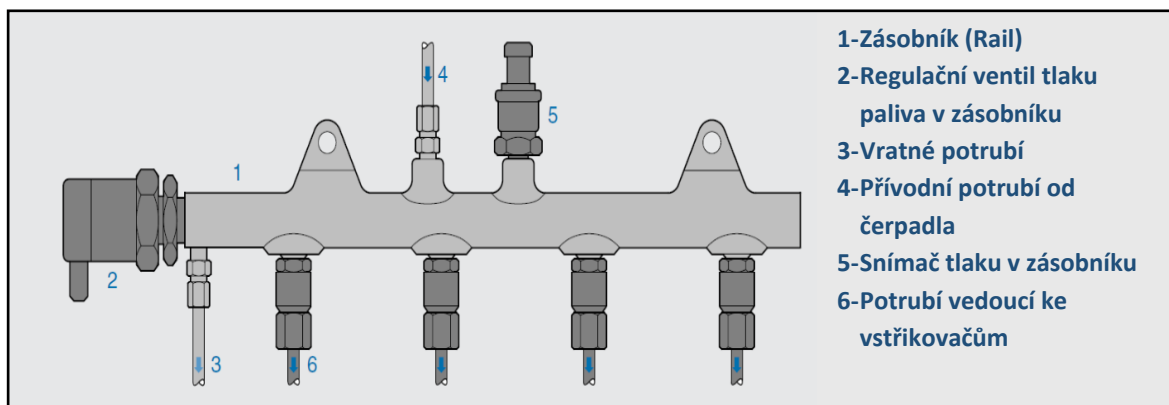
potřebný výkon k pohonu čerpadla a zlepší se celková účinnost motoru. K regulaci tlaku dochází až v zásobníku paliva. K pohonu čerpadla je použit rozvodový mechanismus; mohou to být ozubený řemen, řetěz, nebo ozubené soukolí. Otáčky čerpadla jsou pevně vázány s otáčkami klikového hřídele v určitém poměru. Poměr otáček motoru a vysokotlakého čerpadla bývá většinou 1:2 či 2:3. U nejnovějšího typu čerpadel CP4 od firmy Bosch může být poměr až 1:1. Na Obr. 7 je zobrazen řez čerpadlem CP4. [13]



Obr. 7. Řez vysokotlakým radiálním pístovým čerpadlem CP4 od firmy Bosch[14]

4.2.2. Vysokotlaký zásobník (Rail)

Hlavní funkcí vysokotlakého zásobníku (tzv. Railu) je akumulování paliva stlačeného na vysoký vstřikovací tlak. Jeho dalším úkolem je tlumení fluktuací tlaku paliva, které vznikají od pístového vysokotlakého čerpadla, a také od jednotlivých vstřikovačů. Na jedné straně musí být objem uvnitř zásobníku dostatečně velký, aby tyto požadavky splnil.



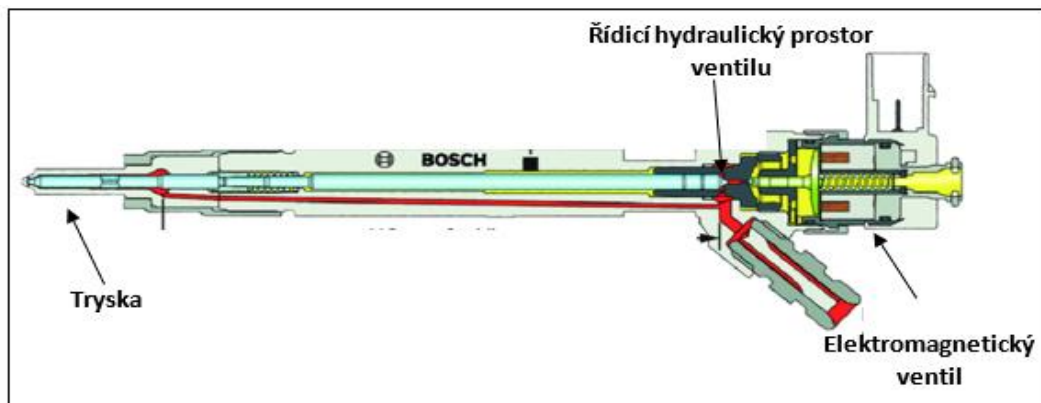
Obr. 8. Popis vysokotlakého zásobníku (railu)[13]

Na straně druhé musí být objem zásobníku natolik malý, aby bylo možné s dostatečnou rychlostí měnit potřebný tlak v zásobníku. Ten je regulován pomocí tlakového regulačního ventilu, jenž je elektromagnetický a ovládaný řídicí jednotkou motoru, která otevírá a přivírá ventil podle požadovaného tlaku paliva. Aby měla řídicí jednotka informaci o aktuálním tlaku v zásobníku, je do něj zaveden také snímač tlaku paliva. Popis vysokotlakého zásobníku je zobrazen na Obr. 8.

4.3. Vstřikovače systému Common-Rail

Vstřikovač je velmi komplexní díl vstřikovací soustavy. Musí pracovat vysokou rychlostí, aby umožnil několik po sobě následujících vstřiků paliva během jednoho pracovního zdvihu pístu. Vstřikovače u osobních vozů jsou schopny vstřiku dávky paliva o objemu od 1 mm³ až 60 mm³, a zároveň pracují s tlaky paliva až 2000 barů.

Systém CR využívá dvou typů vstřikovačů, které se od sebe liší konstrukcí řídicího ventilu. Ten je buď elektromagnetický, nebo piezoelektrický. Tato práce se zaměřuje pouze na vstřikovače ovládané elektromagneticky (viz Obr. 9), ale pro srovnání je v příloze 2 popsán i vstřikovač ovládaný piezoelektricky.



Obr. 9. Řez vstřikovačem Bosch CR12 s elektromagnetickým řídicím ventilem [15]

U systému Common-Rail jsou vstřikovače připojeny přímo k zásobníku krátkým vysokotlakým potrubím, kdy tlak uvnitř vstřikovačů je stejný jako tlak v zásobníku paliva. Velikost dávky paliva vstřikovaného do válce během jednoho vstřiku je řízena dvěma hlavními parametry: tlakem paliva v zásobníku a dobou otevření jehly vstřikovače. Vstřikovače jsou ovládané pomocí řídicí jednotky motoru (EDC), která pomocí snímačů z motoru sbírá data a nastavuje požadované parametry vstřiku paliva: tlaku paliva, délky vstřiku a počtu vstřiků. [13]

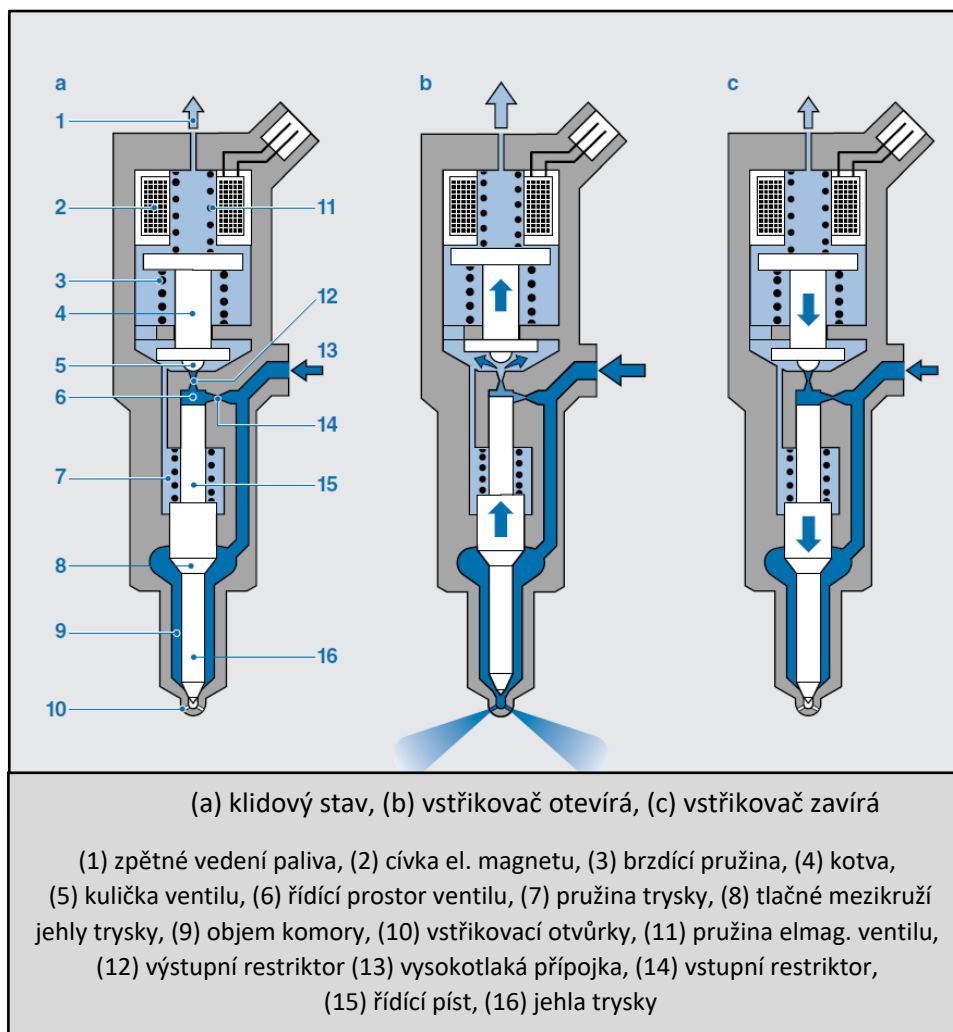
4.4. Vstřikovač s elektromagnetickým ventilem

V této kapitole je uveden popis konstrukce vstřikovače s elektromagnetickým ventilem (viz Obr. 10) a zároveň vysvětlení principu funkce vstřikovače. V závěru kapitoly je popsán způsob řízení vstřikovače. To vše následně ulehčí pochopení dalších kapitol v práci.

4.4.1. Princip funkce vstřikovače s elektromagnetickým ventilem

Fungování vstřikovače lze rozdělit do čtyř fází:

- Vstřikovač uzavřen
- Vstřikovač se otevírá (začátek vstřiku)
- Vstřikovač plně otevřen
- Vstřikovač se zavírá (konec vstřiku)



Obr. 10. Zobrazení funkce elektromagnetického ventilu[13]

Vstřikovač je uzavřen

Ve vstřikovači je palivo stále pod tlakem, který odpovídá tlaku v zásobníku. Tento tlak působí na spodní mezikruží jehly(8). Síla, kterou vyvolá, je menší než síla, kterou působí pružina(7) přitlačující jehlu do sedla dohromady s tlakem nad řídicím pístkem(15) v řídicího prostoru(6). Kuželový konec jehly(16) je natlačen do sedla trysky a palivu je zabráněno proudit skrz otvůrky(10) do spalovacího prostoru.[13]

Otevírání vstřikovače

Elektromagnetickým ventilem(2) začíná procházet proud, kotva(4) je přitažena k elektromagnetu(2), čímž uvolní kuličku(5) ze sedla výstupního restriktoru(12). Tím dojde k průtoku paliva skrz řídicího prostoru(6) do vratného vedení(1). To způsobí pokles tlaku nad řídicím pístkem(15). Síla působící zespodu na mezikruží jehly(8) trysky překonává ostatní síly. Jehla se zvedá ze sedla a dochází k dodávce paliva do válce. [13]

Vstřikovač otevřen

Zdvih jehly je určen rozdílem v průtocích výstupního(12) a vstupního restriktoru(14). Uvnitř řídicího prostoru(6) se vytvoří tzv. palivový polštář, který slouží jako hydraulický doraz jehly. Množství vstříknutého paliva je závislé na době sepnutí elektromagnetického ventilu(2) a tlaku v zásobníku. [13]

Zavírání vstřikovače

Po konci aktivace elektromagnetického ventilu(2), přestává být kotva přitahována a pružina(11) vrací kotvu(2) s kuličkou(5) zpět do sedla. Dochází k uzavření výstupního restriktoru(12) a nárůstu tlaku v řídicího prostoru(6) až na tlak v zásobníku. Tím se znovu vytvoří dostatečná síla, která přitlačí jehlu(16) zpět do sedla a dochází k přerušení dodávky paliva do válce.[13]

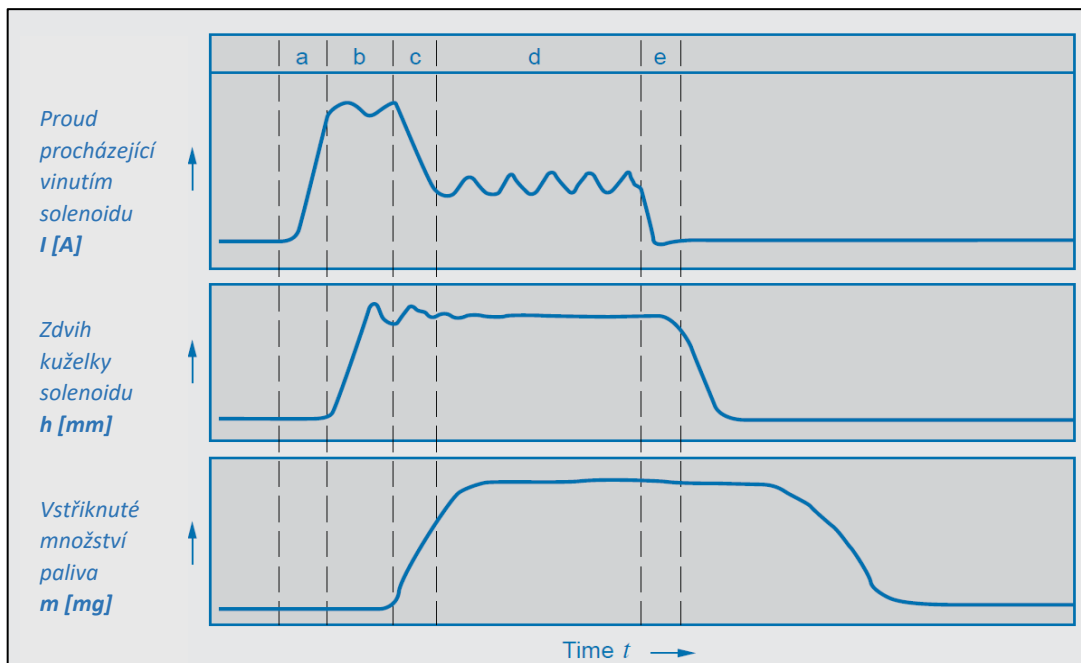
4.4.2. Řízení elektromagnetického ventilu (solenoidu) vstřikovače

Elektromagnetický ventil je v klidové poloze, pokud jím neprochází žádný elektrický proud. V této fázi je kulička či kuželka tlačena do sedla a uzavírá zpětné vedení paliva. Aby došlo k dodávce paliva, je zapotřebí otevření elektromagnetického ventilu. Pro požadované chování ventilu nestačí pouze přivést napětí baterie na svorky solenoidu, ale je zapotřebí měnit proud procházející vinutím. Jeho průběh je vyobrazen na Obr. 11. Řízení elektromagnetického ventilu můžeme rozdělit do dvou hlavních fází:

Fáze otevíracího proudu- V této fázi je nutné, aby došlo k velmi rychlému otevření ventilu a co nejrychlejšímu otevření trysky. K tomu slouží rapidní nárůst procházejícího proudu až na hodnotu přibližně 20 A (hodnota pro vstřikovače Bosch). Pro dosažení této hodnoty proudu, je zapotřebí navýšit napětí na svorkách solenoidu až k hodnotě 50 V.

Fáze přídržného proudu- V této fázi dochází k poklesu proudu na hodnotu, která je dostačující pro to, aby zůstal ventil otevřen. Zamezí se tak průchodu přebytečného proudu, který by způsoboval ohřívání vinutí ventilu a docházelo by k zbytečným ztrátám energie.

[13]



Obr. 11. Profil řídicího proudu procházejícího vinutím elektromagnetu
 (a)-(c) Oblast otevíracího proudu, (d) Oblast přídržného proudu,
 (e) Ukončení průchodu proudu [13]

4.5. Příčiny poruch vstřikovačů

V průběhu životnosti vstřikovače dochází k provoznímu opotřebení vlivem různých okolností. V této kapitole jsou uvedeny příčiny, které vedou ke vzniku poruch elektromagnetických vstřikovačů systému Common-Rail.

4.5.1. Vnitřní usazeniny

Tento typ usazenin se vyskytuje uvnitř vstřikovače a nejvíce ovlivňuje vedení jehly, mezi níž a stěnou vstřikovače je vůle v jednotkách mikrometrů. Usazeniny ulpívají na površích, čímž snižují již tak nízkou vůli a způsobují vážnutí pohybu jehly. Mají tmavě hnědou barvu a vzhledově připomínají usazeniny, které vznikají například při smažení na pánvi. Tento typ usazenin má tendenci vyskytovat se u všech vysokotlakých systémů, ovšem největší problémy způsobuje v systému Common-Rail, a to vzhledem k miniaturním vůlím ve vnitřních částech vstřikovačů. Vznik vnitřních usazenin je spojen s využíváním složek, které jsou obsaženy v aditivech přidávaných do paliv pro zlepšení jeho vlastností. Existují dva hlavní způsoby vzniku vnitřních usazenin. V prvním případě dochází k tvorbě usazenin v důsledku reakce aditiv na kyselé bázi (podporují lubrikaci) a kovových částic (především sodíku), které společně vytváří tzv. kovová mýdla. Kontaminace paliva sodíkem může být způsobena dopravou paliva potrubím, anebo při výrobním procesu FAME či nafty (při tzv. sušení). Druhým typem jsou tvrdé polymerní usazeniny, které vznikají jako reakce aditiv na kyselé bázi či produktů stárnutí paliva s detergentními aditivami (tzv. PIBSI). [16]

4.5.2. Vnější usazeniny

Tvorba těchto usazenin je spojena se špičkou vstřikovače, která zasahuje do spalovacího prostoru. Špička je vystavena vysokým teplotám, které vznikají při procesu spalování. Usazeniny se vyskytují v oblasti vstřikovacích otvorů a způsobují redukci průtoku a změnu tvaru vstřikovaného paprsku paliva. Tyto parametry mají zásadní vliv na průběh spalování ve válci a s tím spojené emise výfukových plynů. Mezi prvky, které z velké míry ovlivňují tvorbu usazenin, se řadí zinek. Už při podílu zinku v palivu v řádech jednotek ppm dochází ke zvýšené tvorbě usazenin na špičce vstřikovače. Ve vztahu

k otázce, zda se zinek při reakcích chová jako katalyzátor či se přímo podílí na reakcích za tvorby oxidů, nejsou literární zdroje jednotné. Dalším faktorem je teplota špičky vstřikovače, kdy dochází se zvyšující se teplotou špičky ke zvýšené tvorbě usazenin. Naopak faktorem redukujícím tvorbu usazenin v otvůrcích vstřikovače je kavitace, která ovšem ve velké míře limituje průtok otvůrky. Proto je nutné brát při návrhu trysky tyto atributy v potaz. [17]

4.5.3. Kontaminace drobnými nečistotami

Palivo, které proudí do palivového systému, obsahuje drobné nečistoty. Ty se do něj mohly dostat v rámci výrobního procesu, při přepravě, uchovávání či manipulaci s palivem během tankovacího procesu. Palivový systém sice obsahuje filtraci, která je schopna zachytit částice o velikost do 3 μm , avšak vzhledem k tomu, že velikost vůlí v těle vstřikovače je v řádech jednotek mikronů (tedy zlomku tloušťky lidského vlasu), jakákoliv drobnější nečistota, která filtrem projde, může mít vliv na opotřebení vstřikovače. Vzhledem k tomu, že filtr postupem času ztrácí svou účinnost, je velmi důležité dodržovat servisní intervaly pro jeho výměnu, aby byla zajištěna jeho správná funkce. Nevyfiltrované částice způsobují opotřebení důležitých povrchů uvnitř vstřikovače, a to může mít za následek například netěsnost vstřikovače.[13]

4.5.4. Nekvalitní palivo, kontaminace vodou

Oproti ostatním vstřikovacím systémům je Common-Rail citlivější na kvalitu paliva. Je důležité, aby paliva měla dostatečné mazivostní vlastnosti. V dřívějších dobách obsahovala vysoký podíl síry, která zlepšovala jejich mazivost. V posledních desetiletích je kladen důraz na výrazné snížení podílu síry v palivu (10mg/kg), protože stejně jako další složky v něm má negativní vliv na zdraví člověka. Dalším negativní vlastností síry je, že způsobuje degradaci filtru pevných částic. Aby i bez síry mělo palivo dostatečné mazací vlastnosti, jsou v současnosti v rafinériích do motorové nafty přidávána aditiva, která dostatečnou mazivost zajišťují. Další nebezpečnou složkou paliva je voda, která musí být odfiltrována ve filtru s odlučovačem vody. Pokud při výrobě či manipulaci s naftou dojde k pochybení a motorová nafta nebude mít potřebné mazivostní schopnosti, může to mít výrazný vliv na celkovou životnost vstřikovacího systému.[18]

4.6. Projev poškozených vstřikovačů

V rámci diplomové práce bylo provedeno měření vstřikovačů s provozním opotřebením. Jelikož opotřebené vstřikovače mají zásadní vliv na chování motoru, jsou v této kapitole uvedeny nejčastější projevy vadných vstřikovačů.

4.6.1. Rozsvícení kontrolky MIL (Malfunction indicator lamp)

Kontrolka MIL se aktivuje v případě, že závada je příčinou nesprávné funkce systému zajišťujícího nízké emise škodlivin ve výfukových plynech. V okruhu vstřikovačů řídicí jednotka kontroluje hodnoty napětí a odporu. Pokud jsou tyto hodnoty mimo stanovený interval, dojde k rozsvícení kontrolky MIL (viz Obr. 12). Na vině mohou být elektrické kabely vedoucí ke vstřikovačům, které mohou být zkorodované, přerušené, anebo u nich dochází ke zkratu. Rozsvícení kontrolky může být spojeno i s poruchou mechanické části vstřikovače; dochází například k zadrhávání jehly vstřikovače a v návaznosti na to ke snížení vstřikovaného množství paliva během konstantní doby aktivace elektromagnetu. Řídicí jednotka zaznamená nesouměrnost chodu díky sníženému výkonu u jednoho z válců a snaží se dobu aktivace elektromagnetu vstřikovače



Obr. 12. Zobrazení kontrolky MIL[19]

prodloužit, aby se zajistila souměrnost chodu motoru. Jestliže je tzv. korekce dávky paliva příliš vysoká, rozsvítí se kontrolka MIL. V mnoha případech je rozsvícení kontrolky spojeno s dalšími vnějšími projevy. Naopak mírné provozní opotřebením vstřikovačů není řídicí jednotka schopna rozpoznat. [20]

4.6.2. Prodloužení doby startu motoru

U tohoto poruchového stavu je velmi náročné určit, jestli je prodloužení doby startu motoru spojeno se závadou na vstřikovací soustavě, popř. vstřikovači, nebo jestli se problém způsobuje jiná součást motoru. Omezíme-li se – s ohledem na téma této práce – na problematiku vstřikovacího systému, pak je tato závada spojena s netěsnostmi ve

vstřikovači. Při netěsnosti vstřikovače dochází k proudění paliva zpětným vedením v době, kdy má být vstup do zpětného vedení elektromagnetickým ventilem uzavřen. Vzhledem k tomu, že všechny vstřikovače jsou přímo spojeny s tlakovým zásobníkem paliva, trvá vysokotlakému čerpadlu při netěsnosti vstřikovače delší dobu, než vytvoří potřebný tlak v zásobníku a dojde ke vstřiku dostatečného množství paliva pro start motoru. [21]

4.6.3. Kolísání volnoběžných otáček, tvrdý chod motoru

Při volnoběžných otáčkách motoru je tlak paliva v zásobníku nízký oproti plnému zatížení. Jelikož je jehla vstřikovače otevírána silou, která je úměrná tlaku paliva, je tato síla výrazně nižší, než když je motor v zatížení. Vlivem usazenin či nečistot dochází k navyšování odporu ve vedení jehly vstřikovače. To má za následek, že rychlost otevírání jehly se zpomaluje, protože síla vytvořená od tlaku paliva není dostatečně velká, aby s dostatečnou rychlostí překonala odpor ve vedení. Dochází tak ke změně vstřikovaného množství paliva do jednotlivých válců. Při volnoběhu je zároveň vstřikovaná dávka paliva velmi nízká, a proto jakákoliv odchylka od požadovaného množství se projeví zvýšenými vibracemi motoru. [21]

4.6.4. Vynechání vznětu u jednotlivých válců

Provozní opotřebení vstřikovače se dostane do takové fáze, v níž vstřikovač není schopen zajistit dostatečnou dávku paliva ke vznícení směsi ve válci. K tomuto jevu může docházet trvale, to znamená, že se zablokuje jehla vstřikovače v uzavřené či mírně otevřené poloze, anebo dočasně, kdy se jehla otevírá nedostatečně rychle, aby se do válce rozpráškilo dostatečné množství paliva potřebného ke vznícení směsi. [21]

4.6.5. Zvýšená spotřeba paliva

Zanášení špičky vstřikovače vnějšími či vnitřními usazeninami má za následek změnu tvaru vstříknutých paprsků paliva. Může dojít například k ucpání jednotlivých otvůrků vstřikovače. To má za následek zhoršení promísení paliva se vzduchem a snížení účinnosti, tudíž i výkonu motoru. Aby se kompenzovalo snížení výkonu, je do válce dopravena větší

dávka paliva, což vede ke zvýšené průměrné spotřebě. Dalším důvodem může být netěsnost vstřikovačů, protože spotřebujeme více výkonu k pohonu vysokotlakého čerpadla; stlačené palivo uniká do zpětného vedení, tudíž potřebujeme větší výkon k vytvoření určitého tlaku. [20]

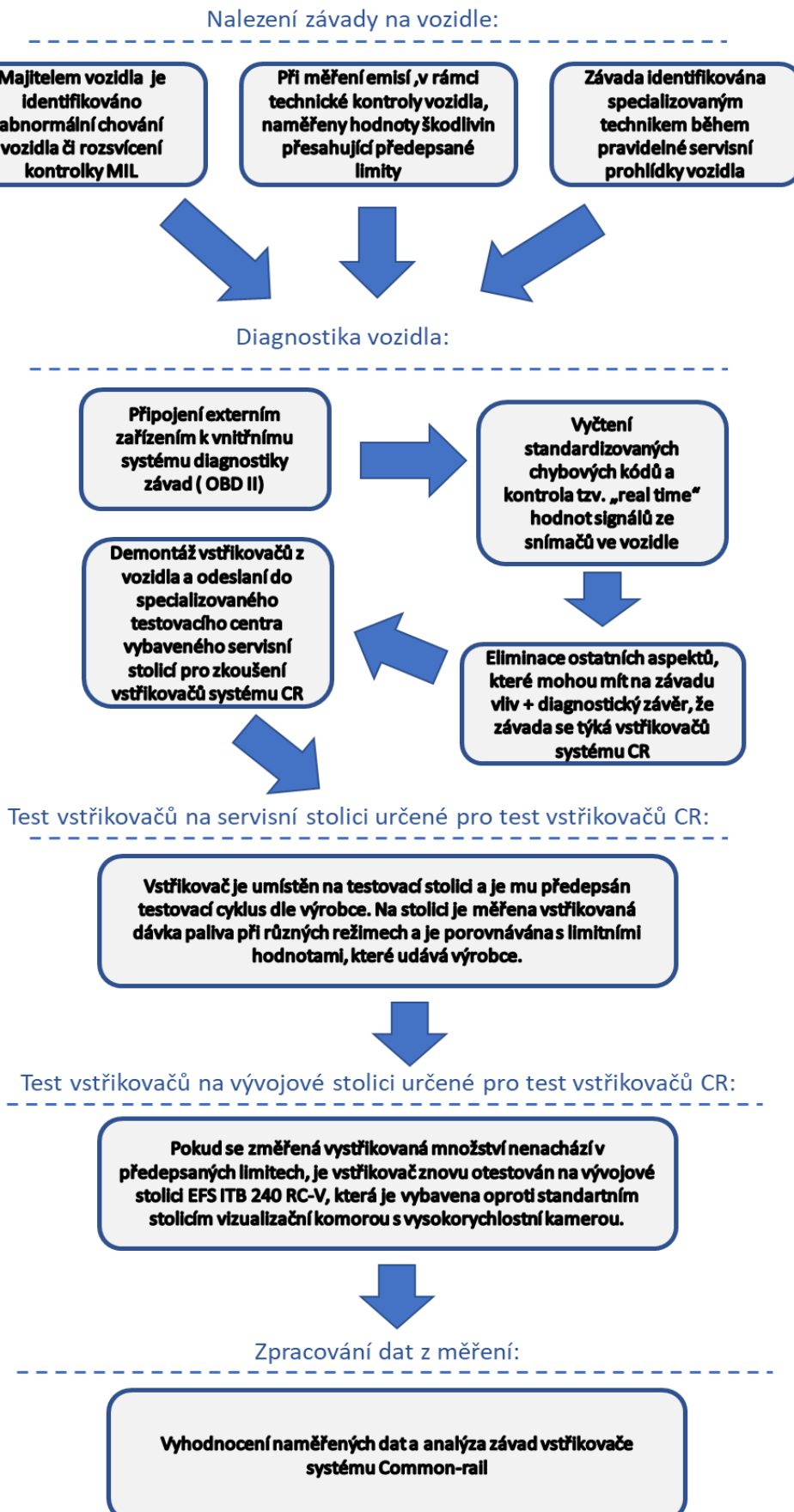
4.6.6. Nadměrná tvorba sazí

Při deformaci vstřikovacích paprsků vznikají ve spalovacím prostoru vzhledem k zaneseným otvůrkům vstřikovače příliš bohaté zóny, ve kterých nedochází k správnému mísení paliva se vzduchem a přebytečný uhlík nám při spalování vytváří saze. Pokud jsou vozidla vybavena filtrem pevných částic (DPF-Diesel Particulate Filter), nemusí se zvýšená produkce sazí na první pohled projevit, protože filtr viditelný černý kouř pohltí. To je ovšem spojeno s častější regenerací DPF, a tudíž se zvýšenou spotřebou. [21]

4.6.7. Snížení výkonu motoru

Dojde k němu, pokud není vstřikovač schopen dostatečně rychlé odezvy na elektrický signál, či je průtok limitován ve vstřikovacích otvůrcích vzhledem k usazeninám na špičce vstřikovače. Do spalovacího prostoru je dodána dávka paliva, která je značně nižší, než je požadováno od řídicí jednotky, a dochází tak ke snížení výkonu. Snížení výkonu se může projevit i tehdy, když při sešlápnutí plynového pedálu dochází k nepravidelné akceleraci. To znamená, že při jednotlivých vstřicích nastává fluktuace vstřikované dávky paliva. [20]

5. Metodika měření vstřikovačů



5.1. Diagnostika vozidla pomocí univerzálního diagnostického přístroje

Veškerá vozidla se vstřikovacím systémem Common-Rail jsou vybavena vnitřním systémem diagnostiky OBD II (On-Board Diagnostics). OBD II zajišťuje kontrolu systémů, které by při poruše měly vliv na zhoršené emisní chování vozidla. Pokud je při kontrole systémů objeven problém či porucha, uloží do paměti standardizovaný chybový kód DTC (Diagnostic Trouble Code). Pokud má závada zásadní vliv na emisní chování vozidla, rozsvítí se kontrolka MIL (Malfunction Indicator Light). Pro komunikaci s řídicí jednotkou automobilu je používán univerzální diagnostický přístroj, který se k jednotce připojí pomocí standardizované diagnostické zásuvky CARB.

V technické praxi je ve většině případech prvním krokem připojení diagnostického přístroje a vyčtení uložených chybových kódů. Podle druhu chybového kódu lze dále vydedukovat, ve které části vozidla se může závada nacházet. Při závadě na vstřikovacím systému CR se nejčastěji vyskytuje chybový kód P0266.

5.1.1. Chybový kód : P0266 - Cylinder 2 -contribution/balance fault

Tato kapitola uvádí příklad, jaký chybový kód může být v případě vadných vstřikovačů uložen do paměti závad. Tento chybový kód upozorňuje na závadu na druhém válci a lze ho interpretovat tak, že v pořadí druhý válec se méně podílí na celkovém výkonu motoru. Tento problém se může týkat kteréhokoliv z válců, ale v této kapitole je uveden pouze chybový kód týkající se druhého válce motoru.

Řídicí jednotka motoru neustále monitoruje a řídí motor tak, aby jeho chod byl co nejefektivnější. U čtyřdobého pístového spalovacího motoru, není dodávaný výkon konstantní, ale nastávají jeho fluktuace. To je způsobeno tím, že u čtyřdobého motoru dochází k pracovnímu zdvihu pouze jednou za čtyři zdvihy, tedy jednou za 720°. U čtyřválcového motoru tak dojde k pracovnímu zdvihu jednou za 180°. To způsobuje, že otáčky spalovacího motoru nejsou konstantní, ale dochází k neustálému zrychlování a zpomalování klikového hřídele. Pomocí snímače rychlosti klikového hřídele je řídicí jednotka schopna snímat tyto fluktuace počtu otáček, a tedy spočítat zrychlení klikové hřídele při pracovním zdvihu. Pokud řídicí jednotka vyhodnotí, že při pracovním zdvihu u jednoho z válců nedochází k dostatečnému zrychlení klikové hřídele, je kód uložen do paměti a rozsvícena kontrolka MIL. Pravděpodobnou příčinou vzniku tohoto chybového

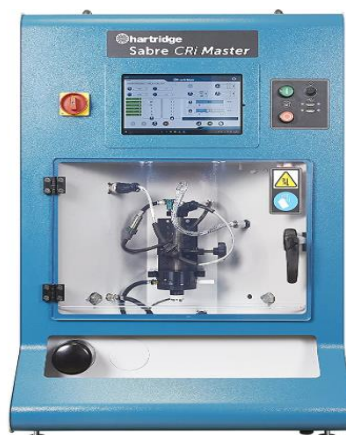
kódu je dodávka nedostatečného množství paliva do spalovacího prostoru vlivem špatné funkce vstřikovače. [23]

5.1.2. Živá data (Live Data)

Diagnostický přístroj umožňuje číst data, která jsou zpracovávána řídicí jednotkou motoru. Na displeji přístroje nebo počítače připojeného k diagnostickému přístroji je pak možné zobrazit hodnotu dat, nebo jejich časový průběh vykreslovat do grafů. Zkušený technik je schopný z uvedených dat vyčíst, že je určitá komponenta motoru vadná a nechová se správně. Pro diagnostikování vadných vstřikovačů se zkoumají hodnoty korekčních dávek paliva u jednotlivých vstřikovačů. Korekcí vstřikované dávky paliva se řídicí jednotka snaží zajistit klidný chod motoru. Standardní hodnoty korekcí bývají ± 1 mg/zdvih. Pokud u vstřikovačů dochází k větším korekcím, mohou tyto hodnoty značit vadný vstřikovač. Z těchto hodnot ovšem nelze jednoznačně určit, že závada je ve vstřikovači. Je nutno zkontrolovat, jestli jednotlivé válce mají správnou hodnotu kompresního tlaku při poloze pístu v horní úvrati. Pokud by docházelo k velkým odchylkám jednotlivých válců a byla u nich zvýšena korekční dávka paliva, je to známka špatné mechanické kondice motoru. [24]

5.2. Testování vstřikovačů na servisních stolicích

Testovací cyklus, kterým je hodnocen stav vstřikovače na servisních stolicích, je předepsán výrobcem vstřikovače. Výstupem ze servisní stolice je protokol, ze kterého je možné vyčíst stav vstřikovače. Příklad protokolu ze servisní stolice lze nalézt v příloze 3.



*Obr. 13. Servisní stolice od výrobce
Hartridge*

Před zahájením testovacího cyklu zkontroluje stolice odpor cívky elektromagnetu, aby se v případě vadného elektromagnetu vyloučil jeho vliv na výsledky. Dále se měří objem paliva, který se vrací zpětným vedením do nádrže. V hlavní části se měří též objem paliva vstříknutý během jednoho cyklu, přičemž jsou automaticky nastaveny hodnoty tlaku a délka impulzu, které odpovídají nízkému, střednímu a vysokému zatížení motoru. Nakonec jsou nastaveny hodnoty odpovídající pilotní dávce paliva a měří se její objem. Poté, co jsou dávky změřeny, porovnají se s limitními hodnotami předepsanými výrobcem. Toto je základní cyklus, který je součástí každého testu zadaného výrobcem. Testovací cykly pro vstřikovače různých výrobců se mohou lišit, a to pouze počtem proměřených bodů, ve kterých vstřikovač pracuje. Servisní testovací stolice jsou vybaveny průtokoměrem, který je schopen změřit objem paliva dodaný během jednoho vstříku. Nedostatkem těchto stolic je, že pomocí nich nedokážeme zanalyzovat stav otvůrků ani tvar vstřikovacích paprsků. Na Obr. 13 je pro ukázkou zobrazena stolice od výrobce Hartridge.

5.3. Popis měřicí stolice EFS ITB 240 RC-V

Měřicí stolice EFS ITB 240 RC-V se nachází v laboratoři vstřikování ve výzkumném centru VTP Rožtoky. Slouží k měření parametrů vysokotlakých komponent systému Common Rail, jako jsou vysokotlaká čerpadla a vstřikovače s elektromagnetickým



Obr. 14. Měřicí stolice EFS ITB RC-V[22]

ovládacím ventilem. Ve standardní konfiguraci umožňuje měřit točivý moment vysokotlakého čerpadla a průtok paliva čerpadlem. Pro měření parametrů vstřikovačů se

využívají dvě hlavní komponenty: měřicí stolice IFR systém a vizualizační komora. Při testování vstřikovačů lze libovolně nastavovat podmínky, za kterých bude probíhat test. Stolice je schopna dosáhnout vstřikovacího tlaku až 3000 barů. Stolice je vybavena elektronikou umožňující vytvoření libovolného průběhu a délky aktivačního signálu, kterým je buzen elektromagnet vstřikovače. Na Obr. 14 je zobrazeno uspořádání vývojové měřicí stolice.

5.4. Systém IFR (Instantaneous Mass Flowmeter)

Systém IFR je speciální průtokoměr schopný měřit parametry vstřikovače s velkou

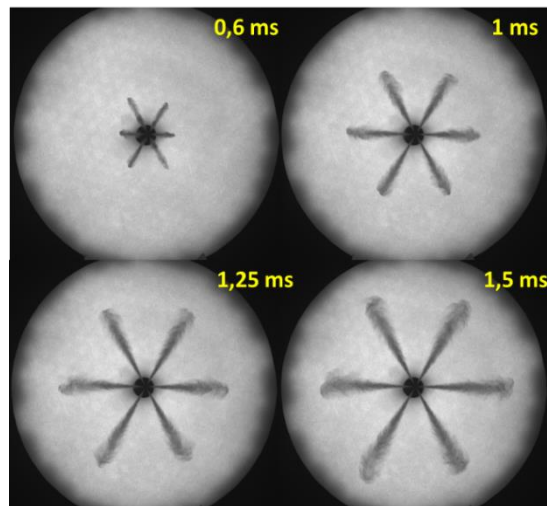
Název:	Anglický název	Jednotky:
Opoždění uzavření vstřikovače	(Closing delay)	μs
Rychlost zavírání vstřikovače	(Closing speed)	mg/ms
Hmotnost vstřikované dávky	(Injected mass)	mg
Objem vstřikované dávky	(Injected Volume)	mm ³
Délka vstřikování	(Injection length)	μs
Okamžik začátku vstřikování	(Injection start time)	μs
Okamžik maximálního průtoku paliva	(Max. injection rate Time)	μs
Maximální průtok paliva	(Max. injection rate value)	mg/ms
Zpoždění otevření trysky	(Opening delay)	μs
Rychlost otevírání vstřikovače	(Opening speed)	mg/ms

Tab. 1. Měřené parametry

přesností. Během jednoho cyklu změří parametry až deseti jednotlivých vstřiků paliva. To znamená, že lze nastavit sekvenci vstřiků odpovídající reálným podmínkám, kdy se v určitých režimech motoru vstřikuje pilotní, hlavní a dovstřiková dávka paliva. Parametry, které je systém IFR schopen měřit, jsou uvedeny v tabulce níže a podrobněji rozebrány v kapitole 6. Výhodou systému IFR je jeho schopnost zaznamenat průběh dodávky paliva během jednoho vstřiku, což průtokoměry, které využívají servisní stolice neumožňují.

5.5. Vizualizační komora

Součástí vybavení měřicí stolice je také vizualizační komora, která umožňuje zobrazit paprsky rozprášeného paliva ze vstřikovače. Uvnitř komory je možné vytvořit atmosféru, která simuluje vstřik paliva do válce. Přes přepouštěcí ventil je ke komoře připojena dusíková tlaková lahev, umožňující uvnitř komory vytvořit tlak až 50 barů. Pro zachycení paprsků jsou ke komoře přichyceny dvě vysokorychlostní kamery. Jsou umístěny horizontálně a vertikálně, takže přinášejí pohled na jednotlivé paprsky jak z boku, tak ze spodu. Pro měření v rámci diplomové práce, je využita pouze spodní kamera, která poskytuje dostatečný pohled na chování paprsků. V rámci vizualizační komory můžeme dále využít pohyblivé clonky a zastínit část komory například pro pozorování pouze určitého paprsku paliva. Komora má speciální odmlžovací systém, aby



Obr. 15. Spodní pohled do vstřikovací komory, zobrazení paprsků v různých fázích vstřiku

byla zajištěna dobrá viditelnost pro každý pořizovaný snímek. Na Obr. 15 jsou seskupeny snímky ze spodní kamery, které zobrazují vstřikované paprsky paliva v různých časových okamžicích. Na stolici je možné libovolně zvolit časový okamžik, ve kterém chceme pořídit snímek. Rychlost kamer je ovšem limitována, takže lze pořídit pouze jeden snímek během jednoho vstřiku do komory. Zobrazené fáze paprsků paliva na Obr. 15 nepřípadají jedinému vstřiku paliva, ale byly pořízeny při odlišných vstřicích paliva.

6. Experimentální popis parametrů vstřikovače

V této kapitole jsou uvedeny parametry vstřikovačů, které je možné měřit v rámci experimentu na testovacích stolicích. Následující parametry jsou pak dále využívány k hodnocení opotřebení vstřikovačů a pokud je to možné i k porovnání testovacích stolic navzájem mezi sebou. Kapitola je dále rozdělena na parametry, které je možné měřit na obou typech testovacích stolic a na parametry, které lze měřit pouze na vývojové stolici EFS ITB 240 RC-V.

6.1. Parametry společné pro oba typy stolic

6.1.1. Objem vstřikované dávky

Objem paliva dodaný do válce spalovacího motoru je jedním z hlavních parametrů vzhledem ke kvalitativnímu způsobu řízení vznětového motoru. Vstřikovač musí být schopen zajistit jak pilotní dávku o malém objemu kolem $1,5 \text{ mm}^3/\text{cyklus}$, tak i vstřikování maximální dávky při plném zatížení motoru o objemu paliva až $60 \text{ mm}^3/\text{cyklus}$ u osobních automobilů. Přesně odměřený objem paliva je zásadním parametrem pro emisní chování vozidla.

6.1.2. Objemový průtok paliva vratným vedením

Tento parametr je hlavním ukazatelem těsnosti sedla ovládacího ventilu vstřikovače. Vlivem opotřebení v průběhu životnosti vstřikovače nebo ulpíváním usazenin dochází v sedle ventilu k netěsnostem. Skrz ventil tak proudí palivo i v době, kdy je výstup do vratného vedení ze vstřikovače uzavřen. Následkem toho je zvýšený průtok paliva zpětným potrubím. Jelikož je vstřikovač řízen právě otevíráním a zavíráním výstupu do vratného vedení, případná netěsnost zásadně ovlivňuje chování vstřikovače.

U vývojové stolice EFS lze měřit přímo průtok paliva vratným vedením v jednotkách l/min.

Na servisních stolicích tato možnost není a objemový průtok paliva proudící vratným je vztahován na jednotlivé dávky paliva a je udáván v jednotkách $\text{mm}^3/\text{vstřik}$. Ve vyhodnocovacím protokolu je pak uvedeno, s jakým počtem vstřiků za minutu bylo měření provedeno. Pro porovnání hodnot z obou stolic, lze použít přepočtový vztah (1).

$$\dot{V} = \frac{V \cdot f}{10^6} \quad (1)$$

\dot{V}	Objemový průtok paliva zpětným vedením	[l/min]
V	Objem paliva za jeden vstřík	[mm ³ /vstřík]
f	Frekvence vstřikování	[vstřík/s]

6.1.3. Zpoždění otevření trysky (Čas odezvy vstřikovače)

Jedná se o časový úsek mezi vysláním řídicího signálu jednotkou motoru a počátkem vstřikování. Vstřikovači po obdržení signálu trvá určitou dobu, v řádu stovek mikrosekund, než dojde k zahájení vstřikování. Tato skutečnost je způsobena tím, že mezi jehlou a kotvou řídicího elektromagnetu není pevná vazba, ale zdvih jehly je řízen otevíráním a zavíráním výstupu z hydraulického řídicího prostoru. U toho musí dojít k poklesu tlaku, aby došlo k zdvihu jehly. Proto zde dochází ke zpoždění dodávky paliva oproti vyslanému signálu. Z hlediska opotřebení vstřikovače může být tento parametr použit k hodnocení stavu vstřikovače. Z prodlužující doby odezvy lze dovodit, že vstřikovač je určitým způsobem opotřeben. Hlavními vlivy opotřebení jsou: větší odpor, který klade jehla trysky při otevírání a zhoršený průtok řídicím hydraulickým prostorem. Z provedeného měření lze učinit závěr, že standartní doba odezvy vstřikovače se pohybuje v rozmezí od 300 μ s do 600 μ s podle typu vstřikovače a vstřikovacího tlaku.

6.1.4. Teplota testovací kapaliny

Pomocí tohoto parametru není hodnocen stav opotřebení vstřikovače, ale je důležitým parametrem při jeho testování, neboť teplota testovací kapaliny může ovlivnit chování vstřikovače, jelikož kapalina slouží také jako mazivo. K testování vstřikovačů na vývojových i servisních stolicích se využívají speciální předepsané kapaliny dle normy ISO 4113:2010. Tyto testovací kapaliny jsou kalibrovány a musí splňovat předepsané vlastnosti. Většina servisních stolic pracuje s kapalinou o teplotě 40 °C. Použitím těchto kapalin se zajistí reprodukovatelnost výsledků mezi testovacími stolicemi. Pro testování vstřikovačů a ostatních komponent vstřikovacích soustav se nepoužívá motorová nafta, která lze zakoupit u čerpacích stanic. U motorové nafty nelze zaručit vždy stejné termofyzikální vlastnosti, což může vzhledem k nízkým tolerancím součástí vstřikovače

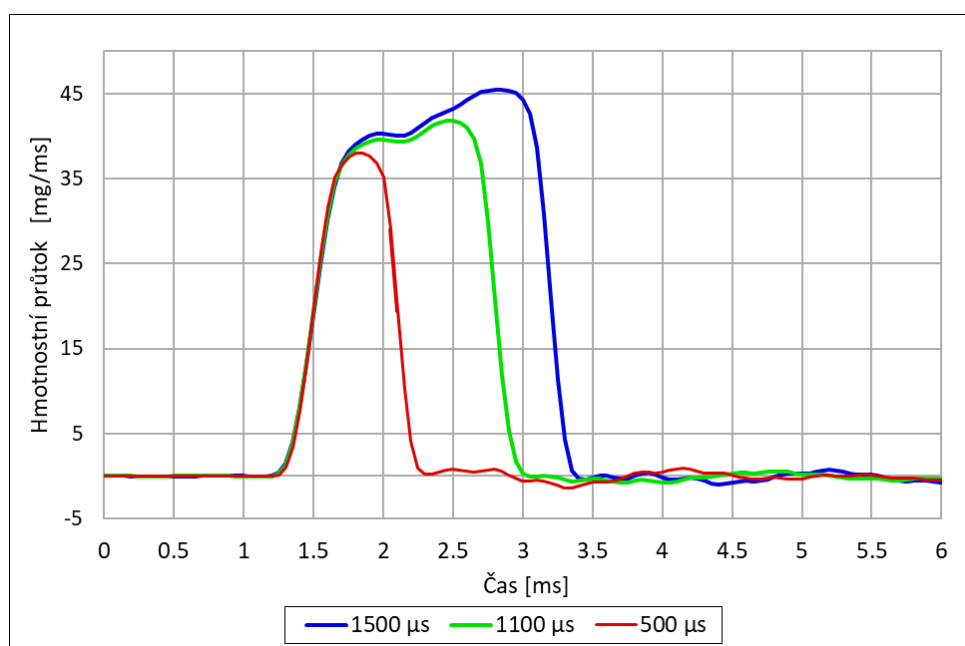
ovlivnit naměřené hodnoty. Testovací kapaliny mají oproti naftě zvýšený bod vzplanutí, aby při stlačování na vysoké vstřikovací tlaky nedošlo k jejich vznícení. To je také jedním z hlavních důvodů, proč jsou u testovacích stolic používány.

6.2. Parametry měřené pouze vývojevou stolicí EFS ITB 240 RC-V

V této podkapitole jsou uvedeny parametry, které lze měřit pouze na vývoje stolicí EFS ITB 240 RC-V. Ne všechny následující parametry jsou využívány k hodnocení opotřebení změřených vstřikovačů. Parametry jsou zde uvedeny proto, aby se vyzdvihly přednosti vývoje stolic.

6.2.1. Hmotnostní průtok

Hlavní předností vývoje stolic je rychlost měření. Stolice je schopna měřit hodnotu hmotnostního průtoku paliva s časovým krokem $50 \mu\text{s}$. Vzhledem k takto krátkému časovému kroku je možné vykreslit průběh vstřikování v čase.



Obr. 16. Průběh hmotnostního průtoku v závislosti na čase při velikosti vstřikovacího tlaku 1600 bar

Příklad průběhu je znázorněn na Obr. 16. V grafu jsou zaznamenány tři křivky pro délky aktivního impulzu $500 \mu\text{s}$, $1100 \mu\text{s}$ a $1500 \mu\text{s}$. Z tvaru křivky lze analyzovat různé vlivy na vstřikování např. tlakové pulzace v přívodním potrubí nebo nadměrné opotřebení

vstřikovače. Dalším parametrem, který stolice zaznamená, je časový okamžik maximálního průtoku.

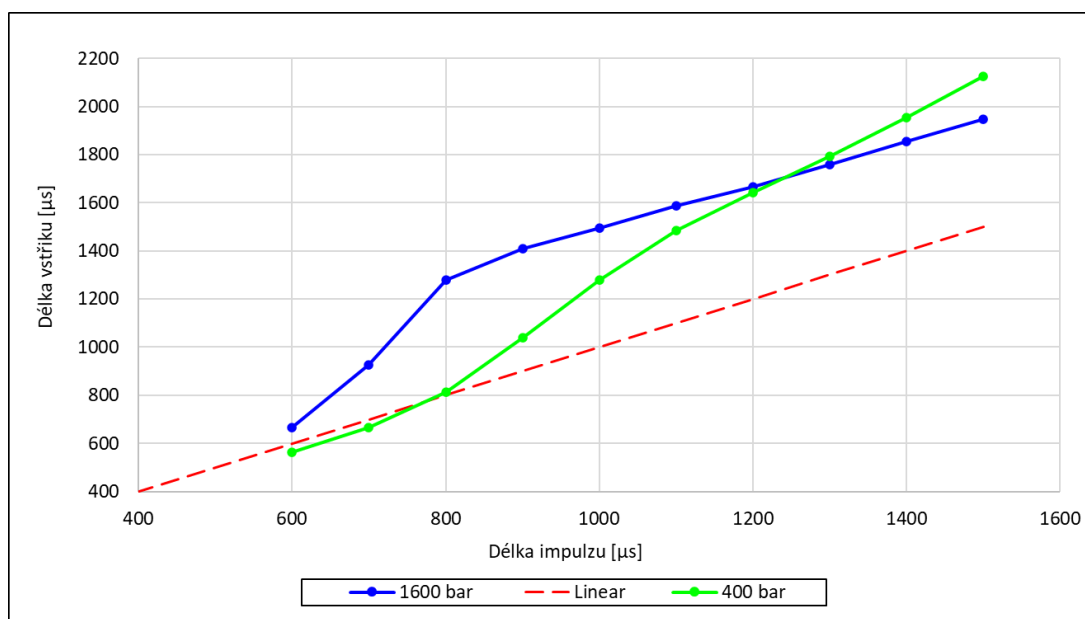
6.2.2. Rychlost otevírání a zavírání jehly

Tento parametr není přímo měřen, ale z průběhů hmotnostní průtoku stolice vyhodnotí rychlost otevírání a zavírání jehly. Pokud dochází v těle vstřikovače ke zvýšení tření vlivem opotřebení, nečistot či usazenin, projeví se to snížením rychlosti.

6.2.3. Zpoždění zavření jehly, délka vstřikování

Synchronizací aktivačního signálu s průběhem hmotnostního průtoku stolice vyhodnocuje zpoždění zavření jehly. Jedná se o čas od konce aktivace řídicího elektromagnetického ventilu vstřikovače po ukončení dodávky paliva. Stolice také zaznamenává celkový čas od počátku do konce vstřiku.

Do grafu na Obr. 17 je vynesena závislost délky vstřikování na délce aktivačního impulsu. Lineární křivka v grafu odpovídá stavu, kdy by délka aktivace odpovídala délce dodávky paliva. Je patrné, že ve většině případů neodpovídá délka vstřikování délce impulsu. To je způsobeno vlivem řízení zdvihu jehly pomocí hydraulického řídicího prostoru.



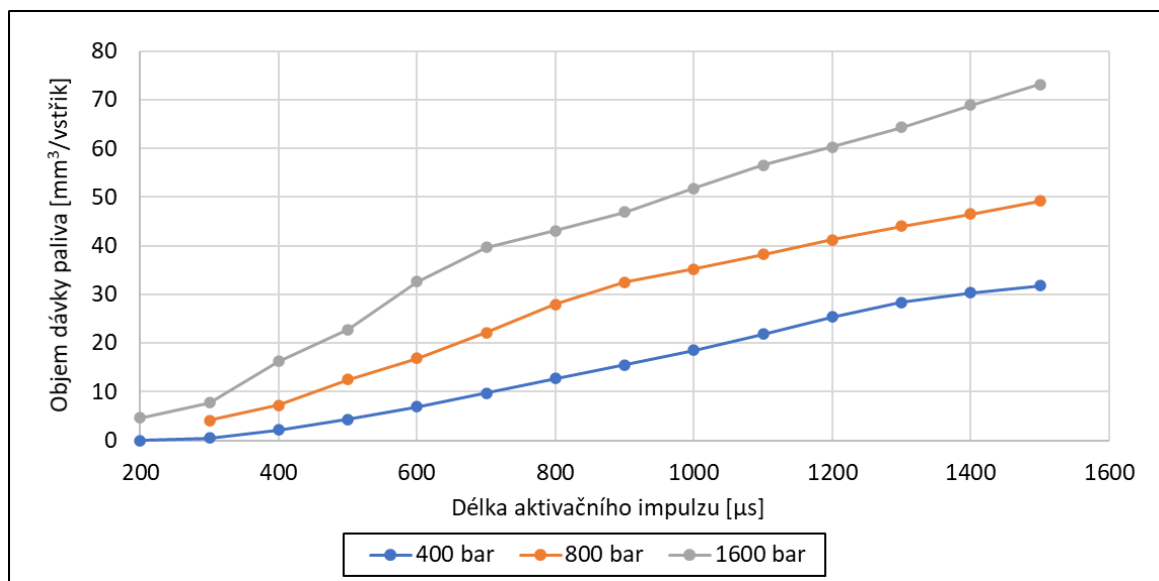
Obr. 17. Závislost délky vstřikování na délce impulsu při vstřikovacích tlacích 400 bar a 1600 bar.

Z grafu lze pozorovat vliv vstřikovacího tlaku na délku vstřikování. Hodnota tlaku určuje velikost síly, která způsobuje zdvih jehly. Při hodnotě vyššího vstřikovacího tlaku dojde k otevření jehly dříve a s větší rychlostí. Jehla se tak při vyšších tlacích zvedne rychleji a za stejný časový okamžik dojde i k vyššímu zdvihu jehly. Po skončení impulzu musí urazit zpět do sedla větší vzdálenost, a to prodlužuje délku vstřikování. Nejvíce je to zřejmé při kratších impulzech, což je viditelné v grafu na Obr. 17. Při délce impulzu 600 μs je při vstřikovacím tlaku 400 bar délka vstřikování dokonce kratší než délka impulzu. Oproti tomu při tlaku 1600 bar je délka vstřikování delší než délka impulzu. Z modré křivky v grafu lze i vyčíst, kdy jehla dosáhla maximálního zdvihu, tj. při délce impulzu 800 μs , kde se křivka láme a stává se přibližně rovnoběžnou s lineární křivkou délky impulzu. To je způsobeno tím, že při delších impulzech je zpoždění otevření a zavření jehly konstantní a přírůstek, o který je délka vstřikování delší než délka impulzu, je dán pouze rozdílem dob zpoždění zavírání a otevírání jehly.

7. Průběh měření na stoličce EFS ITB 240 RC-V (Testovací cyklus)

Chování vstřikovače systému Common-Rail je řízeno dvěma hlavními parametry, kterými jsou: tlak v zásobníku paliva a délka aktivačního impulsu ovládající elektromagnetický ventil vstřikovače. Parametry vstřikování paliva do válce jsou tak řízeny jen pomocí těchto dvou parametrů.

Pro získání co největšího množství informací ohledně chování zvolených vstřikovačů, byl vytvořen cyklus obsahující 42 měřených bodů. Každý měřený bod odpovídal stanovené hodnotě tlaku v zásobníku a délce aktivačního impulsu. Hodnoty tlaku v zásobníku byly nastaveny na 400, 800 a 1600 barů. Při jednotlivých hodnotách nastaveného tlaku byla dále měněna délka aktivačního impulsu od 200 μs do 1500 μs . V každém měřicím bodě bylo provedeno 200 jednotlivých vstřiků paliva, aby se vyloučil vliv náhodných chyb na měření. Z měření vytvořeného cyklu tak získáme kompletní charakteristiku vstřikovače, která je zobrazena na Obr. 18



Obr. 18. Závislost objemu vstřikované dávky paliva na délce impulsu

Dále byl vytvořen krátký měřicí cyklus, který slouží k porovnání hodnot ze servisní stoličky a z vývojové stoličky EFS ITB 240 RC-V. Počet měřicích bodů cyklu se odvíjel od počtu měřených bodů servisní stoličky.

Poslední fází měření bylo připojení vstřikovače k vizualizační komoře a pořízení snímků vstřikovaných paprsků paliva. Měření ve vizualizační komoře je mnohem více časově náročné v porovnání předchozím měření průtokových vlastností. Rozprašováním

paliva v komoře vzniká mlha, která při velké frekvenci po sobě následujících vstřiků limituje ostrost pořizovaných snímků. Proto měření ve vizualizační komoře odpovídá jeden měřicí bod a hodnoty řídicích parametrů jsou nastaveny na 800 baru tlaku v zásobníku a délku impulzu 1200 μs . Komora je naplněna dusíkem o tlaku 40 bar. Snímky jsou pořizovány s krokem 50 μs v intervalu od 300 μs do 1500 μs od počátku aktivace elektromagnetického ventilu. Pro každý časový interval je pořízeno 10 snímků, tak aby se vzájemně neovlivňovaly.

8. Zpracování dat z měřicí stolice EFS ITB 240 RC-V

Součástí softwarového vybavení měřicí aparatury stolice jsou dva programy k zpracování a vyhodnocení dat z měření. První nese název ChartDisplay 2. Tento slouží ke zobrazení dat do grafů a zobrazení dat z textových souborů, které generuje stolice. Pro vyhodnocení výsledků ze získaných dat je ovšem práce s tímto programem časově velmi náročná. Jako nástroj na zpracování dat z jednotlivých měření tak byl využit program MS Excel, který patří k nejrozšířenějším komerčním softwarům pro zpracování dat a většina uživatelů s ním dokáže bez větších problémů pracovat. Byl vytvořen soubor, do kterého byla naprogramována tzv. makra, která pomáhají uživateli automaticky zpracovávat data z měření, vybrat relevantní parametry a zobrazit je v grafech. Program vytvořený v prostředí softwaru MS Excel je popsán v kapitole 8.1.

Druhým programem, který je dodáván výrobcem stolice, je SprayAnalyser. Popis zpracování dat pomocí tohoto programu je popsán v podkapitole 8.2. Zpracovaná data tímto programem jsou pak nahrána do vytvořeného programu, kde je možné si výsledky zobrazit.

V rámci mé diplomové práce proběhlo několik měření, během kterých se nashromáždilo značné množství dat. Tento soubor dat bylo zapotřebí strukturalizovat a vytvořit nástroj pro jednoduchý přístup k datům. Proto byla vytvořena databáze všech testovaných vstřikovačů. Databáze byla vytvořena také pomocí programu MS Excel. Struktura databáze je popsána v podkapitole 8.3.

8.1. Program na zpracování dat ze stolice EFS

Program byl vytvořen za účelem zproduktivnění zpracování dat z měření na vývojové stolici a zároveň bylo zapotřebí vytvořit nástroj, který umožní vzájemné porovnání dat z jednotlivých měření. Vytvořený program se skládá z následujících šesti hlavních karet:

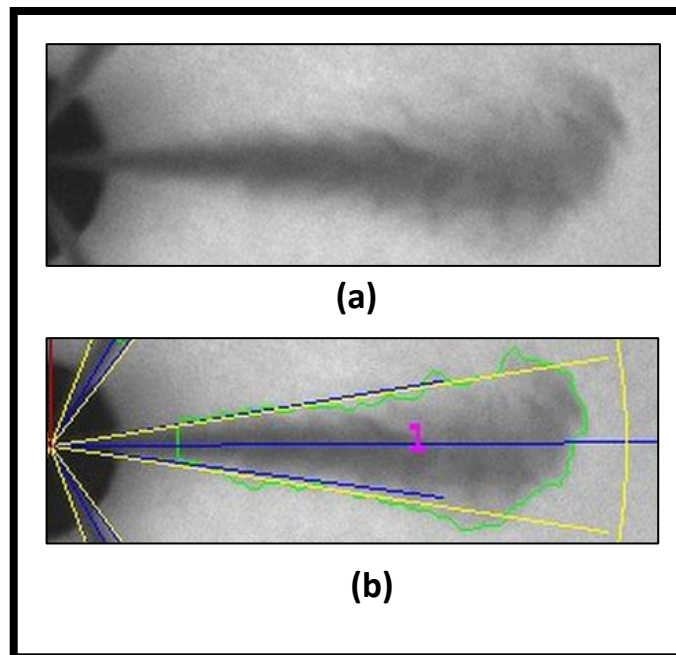
- **Informace_vstrikovac** – Karta obsahuje návod na použití programu, základní informace ohledně vstřikovače a vozidla a vyhodnocené závěry z měření
- **Nacist_data** - Karta umožňuje přímo otevřít textové soubory vygenerované stolicí EFS

- **Zpracovana_data** – Tato karta umožňuje zobrazit parametry všech 200 po sobě následujících vstříků v rámci jednoho měřeného bodu. Uživatel si pomocí dvou rozbalovacích nabídek zvolí měřený bod a následně parametr, který chce zobrazit. Tyto hodnoty se vykreslí do grafu. Hlavní funkcí této karty je kontrola hodnot, jestli nedošlo během měření k chybě. U stolice EFS totiž příležitostně dochází při krátkých impulzech k naměření dávky výrazně vyšší, než by bylo fyzikálně možné.
- **Zpracovana_data_prubeh** - Karta obsahuje graf, který zobrazuje průběh vstříkávání všech 200 vstříků. Pomocí filtrů je pak lze mezi sebou porovnat. Pomocí této karty lze zjistit, jestli dochází k výrazným fluktuacím mezi jednotlivými vstříky paliva.
- **Zpracovane_vysledky** – V této kartě si lze vybrat z rozbalovací nabídky vhodný parametr a jeho hodnota je v grafu zobrazena pro všechny měřené body. Graf je rozdělen do 3 křivek charakterizující tlaky 400 bar, 800 bar a 1600 bar. Pomocí filtrů pak lze zobrazit po jednotlivé křivky nebo je porovnávat mezi sebou. Ukázkou karty lze nalézt v příloze 4
- **Zpracovane_vysledky_prubeh** – Karta zobrazuje v grafu průběh vstříkávání v rámci všech 42 měřících bodů. Lze zobrazit pouze jednotlivé průběhy nebo porovnávat průběhy mezi sebou.

8.2. Soubor dat z vizualizační komory

Výstupem z měření ve vizualizační komoře je soubor obrázků ve formátu .bmp. Pořízené snímky jednotlivých vstříků paliva jsou zpracovány a vyhodnoceny pomocí programu SprayAnalyser 2.0.3.3. Program analyzuje geometrii jednotlivých paprsků vstříkovaného paliva. Na základě této geometrie následně vyhodnocuje tyto parametry:

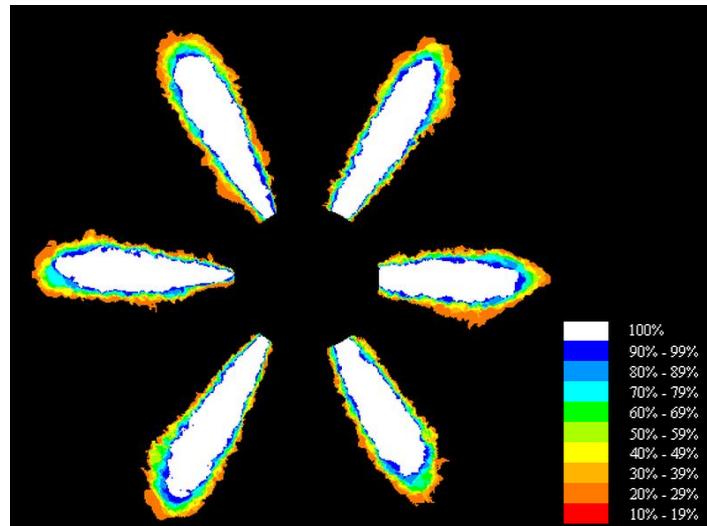
- Délka penetrace
- Úhel rozevření paprsku
- Úhly jednotlivých paprsků
- Obsah a objem paprsku
- Symetrii paprsku
- Souměrnost délky jednotlivých paprsků



*Obr. 19. Zachycený paprsek:
 (a) před zpracováním,
 (b) po zpracování programem SprayAnalyser*

Program vytvoří další sadu obrázků již s vyznačenými parametry viz Obr. 19, které jsou vyhodnocovány. Hodnoty vyhodnocených parametrů jsou poté uloženy do jednotlivých textových souborů. Každý textový soubor odpovídá jednotlivému okamžiku zachycení od počátku impulsu a obsahuje parametry všech deseti provedených vstříků. Ty jsou následně zprůměrovány a uloženy do celkového souboru s výsledky. Pro zobrazení dat z textového souboru je také využíván vytvořený program v excelu. Na kartě Vizualizacni_komora jsou data přehledně uspořádána do tabulky. Na kartě se také nachází hypertextový odkaz přímo na složku s vyhodnocenými obrázky, aby nebylo nutné jejich zdoluhavé dohledávání.

Dalším výstupem z programu je vizualizace pravděpodobnosti výskytu paprsku. Příklad lze nalézt na Obr. 20. Tento obrázek vznikl na základě provedených 10 vstříků. S ohledem na průchod paliva otvůrky a následné rozprášení paliva nemá každý paprsek totožný tvar. A to z důvodu turbulence, kde vznikající víry mají náhodný charakter. Bílá barva značí oblast, ve které se rozprášené palivo vyskytovalo ve 100 % případů. Na druhé straně stupnice jsou oblasti červené, které značí výskyt od 10 % do 19 %.



Obr. 20. Zobrazení pravděpodobnosti výskytu paprsků paliva v komoře na základě 10 provedených vstřiků

8.3. Databáze vstřikovačů

Vzhledem k velkému objemu dat vzniklého během měření v rámci diplomové práce bylo zapotřebí najít nástroj, který ulehčí práci s daty a zároveň je umožní logicky uspořádat. V rámci diplomové práce, tak vznikla databáze otestovaných vstřikovačů. Jako nástroj pro vytvoření databáze byl použit program Microsoft Excel. Byl vytvořen soubor database.xlsx, který obsahuje tabulkový registr. Databáze je rozdělena do následujících kategorií.

- Značka vozidla
- Parametry motoru
- Rok výroby
- Závada / Projev vadných vstřikovačů
- Výrobce vstřikovačů
- Sériové číslo vstřikovače
- Výrobní číslo vstřikovače
- Měřicí cyklus
- Dodatečné informace o měření

Z celkového souboru změřených vstřikovačů lze pomocí implementovaných filtrů zobrazit jen to měření, o které má uživatel zájem. Po vybrání konkrétního měření si uživatel může pomocí odkazu otevřít přímo soubor zpracovávající data z konkrétního měření. Ukázku z databáze lze nalézt v příloze 4.

9. Zhodnocení výsledků z měření vstřikovačů

V následující kapitole jsou uvedeny výsledky z měření v rámci diplomové práce. Struktura zpracování výsledků následuje metodiku uvedenou v úvodu kapitoly 5.

Před porovnáním výsledků z testovacích stolic bylo zapotřebí se zamyslet, jaké neznámé nám vstupují do měření, tedy v jakých vstupních parametrech se mohou stolice lišit. Jako dvě hlavní neznámé byly označeny parametry vstupního potrubí do vstřikovače a tvar řídicího signálu elektromagnetu vstřikovače. Pro obě neznámé byly provedeny citlivostní analýzy, které jsou popsány v kapitole 9.1. a 9.2. Dále jsou v kapitole 9.3 - 9.5 uvedeny jednotlivé sady změřených vstřikovačů, u kterých je hodnocen stav provozního opotřebení a jeho vliv na chování motoru.

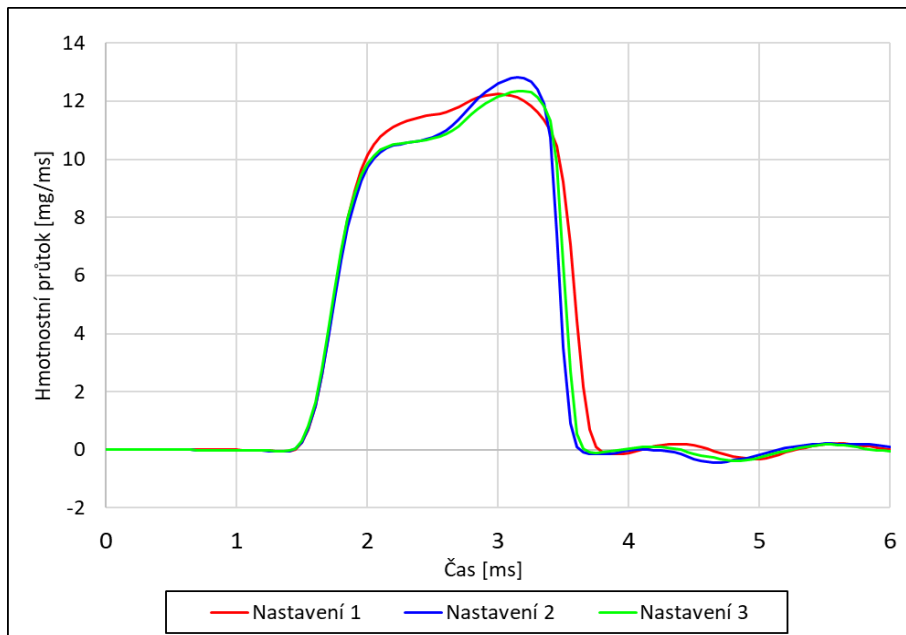
9.1. Analýza vlivu přívodního potrubí na měřené hodnoty

Při práci na vývojové stolici EFS bylo zjištěno, že výrobcem dodané vysokotlaké hadicové vedení od zásobníku ke vstřikovači je zakončeno převlečnou maticí M14. Ovšem některé sady testovaných vstřikovačů měly na vstupním šroubení závit o velikost M12. Bylo tak za potřebí dovybavit stolicu dodatečným vysokotlakým vedením se zakončením M12, aby se měření mohlo uskutečnit.

Po odstranění překážky s rozdílnou velikostí šroubení, vyvstal další problém v nedostatečné délce dodatečného potrubí, kdy nebylo možné provést měření ve vizualizační komoře. V návaznosti na to musela být alternativně propojena obě vedení, aby se mohla využívat obě měřicí zařízení. Na základě vytvoření tohoto nestandardního vedení, které je v porovnání s vysokotlakým potrubím u reálného motoru velmi odlišné, byla provedena citlivostní analýza na vliv přívodního vysokotlakého vedení.

Pro měření citlivosti na vstupní vysokotlaké vedení, byl určen vstřikovač značky Delphi, který ani dle protokolu ze servisní stolice nevykazoval žádnou závadu. Vstřikovač byl připojen k zásobníku třemi různými způsoby nastavení vysokotlakého vedení popsanými níže.

- **Nastavení 1** - Vstřikovač připojen pouze dlouhou flexibilní vysokotlakou hadicí s délkou 70 cm, která byla součástí vybavení stolice.
- **Nastavení 2** - Vstřikovač připojen pouze krátkým ocelovým potrubím o délce 30 cm se zahnutím 90° u jednoho z konců
- **Nastavení 3** - Vstřikovač připojen pomocí vzájemně propojeného ocelového potrubí a flexibilní hadice



Obr. 21. Vliv provedení vstupního vysokotlakého vedení na hmotnostní průtok vstřikovačem

Na Obr. 21 je zobrazen graf, který demonstruje vliv jednotlivých připojení na průběh vstřikování. Následující graf odpovídá měřenému bodu, kde byl nastaven tlak v zásobníku na 400 bar a délka impulsu 1500 μ s. Na průběh vstřikování působí tři hlavní vlivy.

Prvním vlivem jsou hydraulické tlakové ztráty vznikající kvůli tření kapaliny v potrubí. Parametry potrubí, které mají vliv na hydraulické tlakové ztráty, jsou délka a vnitřní průměr potrubí. Tyto ztráty způsobují snížení průtoku paliva vedením.

Druhým vlivem jsou místní hydraulické ztráty vznikající v ohybech na vedení nebo změnou průřezu potrubí. Při vzniku těchto ztrát také dochází ke snížení průtoku.

Třetím vlivem působícím na průběh vstřikování jsou tlakové pulsace ve vedení. Náhlým otevřením vstřikovače (zdvihem jehly) vzniká dekompresní tlaková vlna, která se pohybuje potrubím rychlostí zvuku. U vyústění do zásobníku se dekompresní vlna odrazí

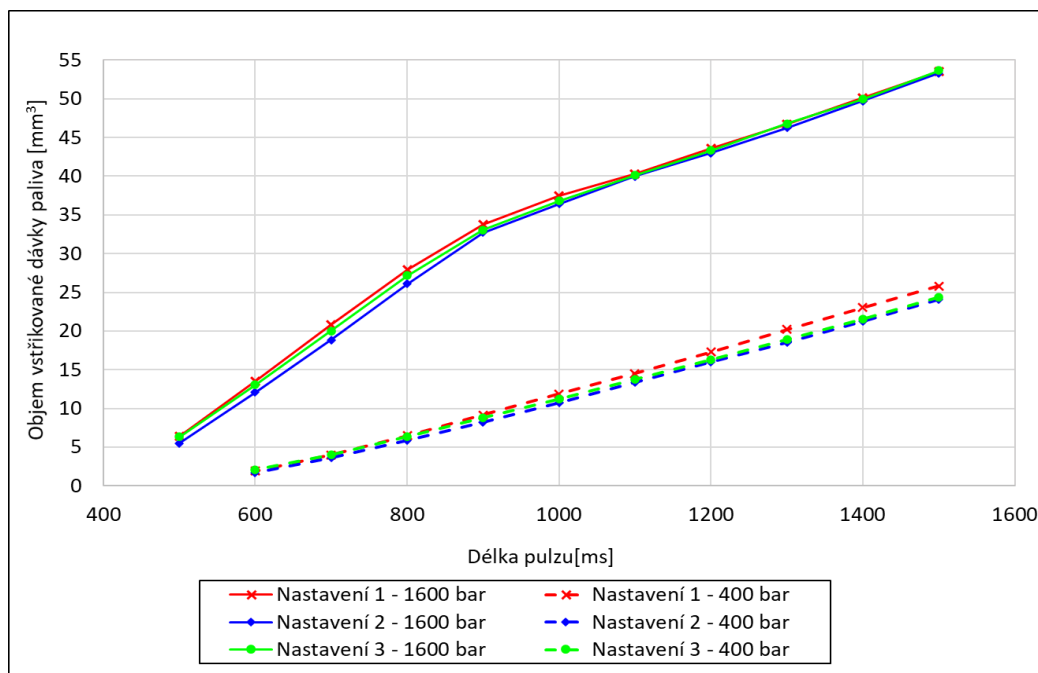
zpět s opačnou amplitudou. Do vstřikovače tak dorazí kompresní vlna, která způsobí navýšení tlaku. Podle načasování mohou tlakové vlny mít pozitivní i negativní účinek na průběh vstřiku.

Z grafu Obr. 21 je lze vyčíst, že u Nastavení 1 s flexi hadicí je v první polovině vstřikování větší hmotnostní průtok vstřikovačem. Zde se projevuje vliv hydraulických ztrát, jak vlivem teoreticky menšího průřezu krátkého ocelového potrubí, tak jeho zakončení s ohybem 90°.

Poté dochází k nárůstu průtoku u všech nastaveních. To je způsobeno přicházející kompresní vlnou do vstřikovače. Je dobře viditelné, že u nastavení 1 nedochází k tak strmému nárůstu oproti ostatním. To je způsobeno dvěma faktory. Kompresní vlna kvůli větší délce potrubí přichází do vstřikovače déle a také flexi hadice pohltí část energie vytvořené vlny. U nastavení 2 lze pozorovat, že kompresní vlna dorazí do vstřikovače dříve a má větší energii. U nastavení 3 lze usuzovat na to, že se kompresní vlna odrazila od vzájemného propojení obou vedení, ale zároveň přišla o část energie, a proto nedošlo k tak výraznému nárůstu jako u nastavení 2.

Na Obr. 22. je zobrazen vliv jednotlivých nastavení na vstřikovanou dávku paliva. Pro každé nastavení byl určen tlak v zásobníku 400 bar a 1600 bar. Délka pulzu byla prodlužována od 500 μ s do 1500 μ s s krokem 100 μ s.

Z měření vyplívá závěr, že použitím různého přívodního vedení nedojde



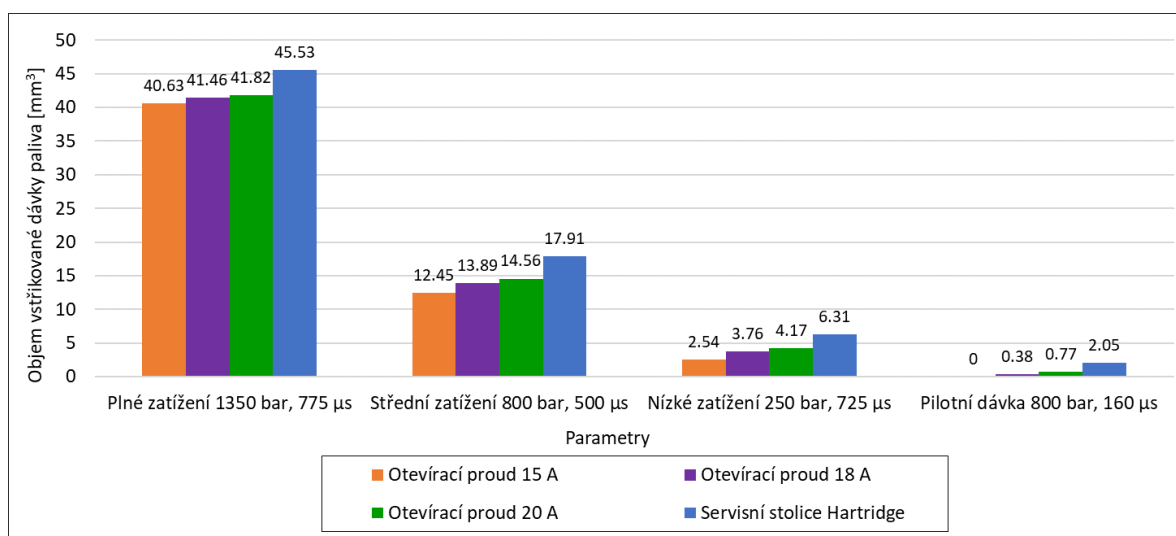
Obr. 22. Vliv přívodního potrubí na vstřikovanou dávku paliva

k zásadnímu ovlivnění naměřených hodnot. Z grafu je patrné, že nejvyšší hodnoty vstřikované dávky jsou naměřeny pouze s flexibilní hadicí. Ovšem je zřejmé, že spojení ocelového potrubí a flexi hadice nebude mít zásadní vliv na výsledky z měření.

9.2. Analýza vlivu řídicího signálu

Další zásadní neznámou pro porovnání se servisní stolicí byly hodnoty proudu a jeho průběh viz kap. 4.4.2. Výrobci servisních stolic neuvádějí hodnoty proudu, při kterých jsou vstřikovače testovány. Bylo tedy zapotřebí zjistit průběh proudu, při kterém bude zaručena správná funkce vstřikovače. Pro první měření na vývojové stolicí byly použity průběhy proudu, které byly uloženy z předchozích měření na stolicí. Maximální hodnoty proudu byly zredukovány, aby nedošlo k poškození vstřikovače. Postupně byly maximální hodnoty proudu navyšovány. Jakmile bylo dosaženo hodnot, kdy i při nejkratších časových impulsích došlo k otevření vstřikovače, byly tyto hodnoty uloženy a dále využívány. Zvolené hodnoty pak byly porovnávány s hodnotami uvedenými v literatuře.

Z prvních měření vyšlo najevo, že při krátkých aktivačních časech je vstřikovaná dávka třetinová až poloviční oproti servisním stolicím. Byla proto vypracována citlivostní analýza na otevíracím proudu vstřikovače ve vztahu ke vstřikované dávce paliva. Byly zvoleny hodnoty otevíracího proudu 15 A, 18 A a 20 A. Bylo by záhodno pokračovat i za hodnotu 20 A, ale kvůli riziku poškození vstřikovače, byla zvolena maximální hodnota otevíracího proudu 20 A. V literatuře se udává hodnota otevíracího proudu pro první a druhou generaci vstřikovačů Bosch okolo 18 A. [25]



Obr. 23. Vliv otevíracího proudu na dávku paliva

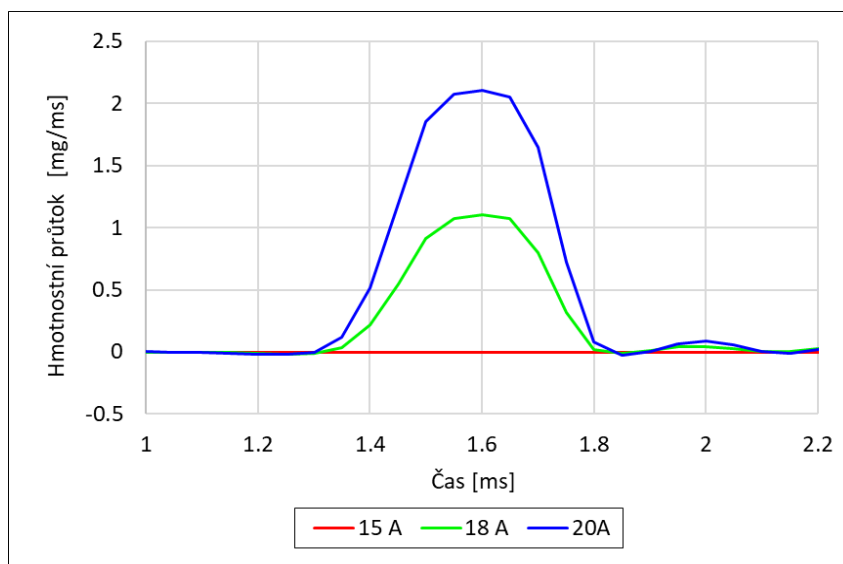
Z grafu na Obr. 23 lze pozorovat, že se zvyšujícím se otevíracím proudem dochází ke zvyšování dávky paliva. Nejvíce se projevuje vliv otevíracího proudu na pilotní dávku paliva. Při zvýšení proudu o 2 A dochází k zdvojnásobení vstřikované dávky paliva. To je způsobeno tím, že při navýšení otevíracího proudu dojde k rychlejšímu přitažení kotvy, a tudíž otevření zpětného vedení. To má za následek dřívější zdvih jehly s větší rychlostí otevírání. Vzhledem k tomu že při pilotní dávce paliva je aktivační impuls velmi krátký, má toto zásadní vliv na množství vstřiknutého paliva.

Na Obr. 24 je zobrazen průběh vstřikování v čase, který je potvrzením předchozího tvrzení. Při proudu 15 A nemá elektromagnet dostatečnou sílu ke zvednutí kotvy a nedochází ke vstřikování. Při zvýšení proudu na 18 A už dochází ke vstřikování, ale v porovnání se vstřikováním při hodnotě otevíracího proudu 20 A je otevírací rychlost pomalejší a hmotnostní průtok poloviční.

Je pravděpodobné, že se zvyšujícím otevíracím proudem by dále docházelo ke zvyšování objemu vstřikované dávky, ovšem ne už tak zásadně.

Velký rozdíl v naměřených hodnotách pilotní dávky u vývojové a servisní stolice, tak může být způsoben jinou hodnotou aktivačního proudu v kombinaci s rozdílným přívodním vedením.

Pro následující měření byla zvolena hodnota otevíracího proudu 18 A s ohledem na bezpečnost vstřikovače.



Obr. 24. Graf závislosti otevíracího proudu na průběh vstřikování.
 Nastavené vstupní parametry: tlak: 800 bar, délka impulsu: 160 μ s

9.3. Sada vstřikovačů 1

Základní informace týkající se vstřikovačů a vozidla u kterého byla diagnostikována závada jsou uvedeny v Tab. 2.

Výrobce vstřikovače	Bosch
Typ vstřikovače	CR1
Typové číslo	0445110066
Výrobní čísla měřených vstřikovačů	1207,1103,1105
Značka vozidla, Model vozidla	Audi A8
Rok výroby vozidla	2001
Počet ujetých kilometrů	250 856 km
Zdvihový objem motoru	3,3 l
Výkon motoru	165 kW

Tab. 2. Základní informace o vstřikovačích Bosch CR1 a vozidle Audi A8

9.3.1. Popis závady

U vozidla se začala projevovat zvýšená kouřivost při studených startech motoru. Dle subjektivního názoru provozovatele vozidla byl chod motoru mnohem tvrdší, než tomu bylo doposud. Tvrdost chodu se projevovala hlavně v oblasti volnoběžných otáček motoru. V rámci technické kontroly bylo na vozidle provedeno měření emisí. Zkušební technik potvrdil, že motor má hrubý chod ve volnoběžných otáčkách a zároveň byla naměřena zvýšená kouřivost přesahující předepsané limity. Vozidla tak bylo označeno za emisně nevyhovující.

9.3.2. Palubní diagnostika

Palubní diagnostika nedetekovala zásadní závadu vzhledem k emisnímu chování vozidla a nedošlo k rozsvícení kontrolky MIL na palubní desce. Po připojení diagnostického zařízení a vyčtení paměti závad nebyl objeven žádný chybový kód týkající se vstřikovací soustavy vozidla.

9.3.3. Servisní stolice Hartridge CRI-PC

Po otestování vstřikovačů na stolicí bylo zjištěno, že 7 z 8 testovaných vstřikovačů je vhodných k opravě. Naměřené hodnoty vstřikovacích parametrů se pohybovaly mimo předepsané limitní hodnoty. K porovnání se stolicí EFS byly ze sady vybrány tři vstřikovače. Dva vstřikovače označené servisní stolicí Hartridge jako vadné a jeden bez závady. Naměřené hodnoty, dle kterých byly vstřikovače označeny za vadné, jsou uvedeny v Tab. 3.

S. Čís. Vstřikovače	Veličina	Tlak paliva	Délka pulzu	Min.	Max.	Naměřeno
1207	Objem dávky	250 bar	725 μ s	3,3	7,3	2,03 mm ³ /cyklus
1207	Variace dávky	250 bar	725 μ s	0	2	2,75 mm ³ /cyklus
1105	Variace dávky	250 bar	725 μ s	0	2	5,79 mm ³ /cyklus

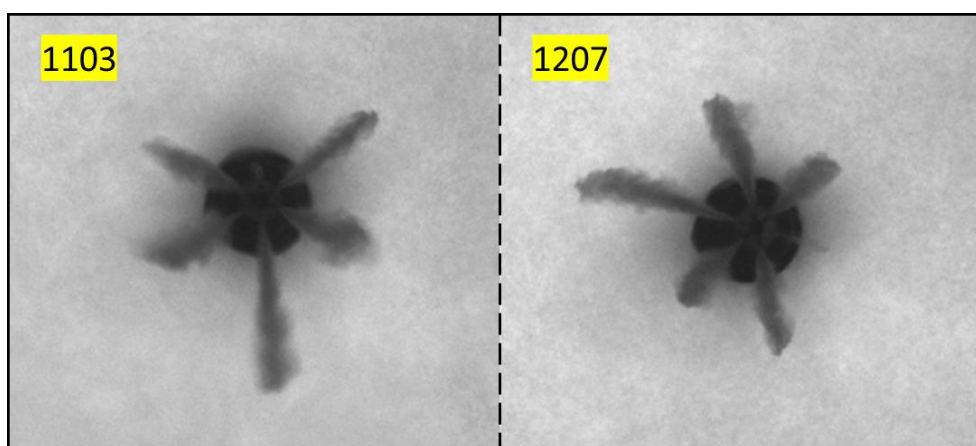
Tab. 3. Hodnoty parametrů změřené servisní stolicí Hartridge CRI-PC

9.3.4. Vývojová stolice EFS ITB 240 RC-V

9.3.4.1. Výsledky z vizualizační komory

K měření ve vizualizační komoře byly vybrány vstřikovače s výrobními čísly 1207 a 1103. Cílem měření pomocí vizualizační komory bylo porovnání stavu vstřikovacích otvůrku vadného a správně fungujícího vstřikovače dle vyhodnocení servisní stolicí Hartridge.

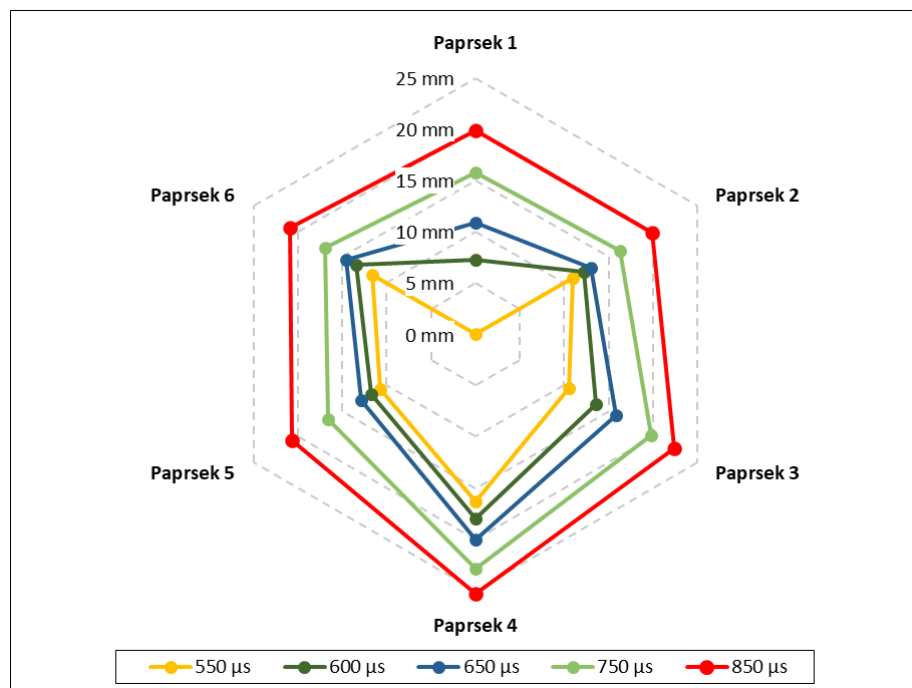
Na Obr. 25 jsou snímky z vizualizační komory. Snímky jsou pořízeny v časovém



Obr. 25. Porovnání vstřikovače 1103 a 1207

okamžiku 550 μ s od počátku aktivace vstřikovače. Z Obr. 25 lze pozorovat, že u obou vstřikovačů má jeden otvůrek zhoršené průtokové vlastnosti natolik, že do okamžiku

pořízení snímku otvůrkem neprotéká téměř žádné palivo. Dále je zřejmé, že pouze jeden otvůrek vytváří optimální kužel paliva. Otvůrek má oproti ostatním tmavší zbarvení ve středu kužele, což značí, že otvůrkem proudí větší množství paliva. U ostatních paprsků paliva dochází k deformaci tvaru paprsku oproti optimálnímu tvaru kužele a penetrace paprsků je kratší. To značí mírné opotřebení i ostatních otvůrků. Na Obr. 26 je v grafu zobrazena závislost délky penetrace paprsků na čase. Z grafu vyplývá, že s pokračujícím zdvihem jehly dochází k vyrovnání průtoku jednotlivými otvůrkami a délka penetrace se vyrovnává. To znamená, že při delších aktivačních impulzech bude tvar vzniklé hvězdičky z paprsků souměrnější.



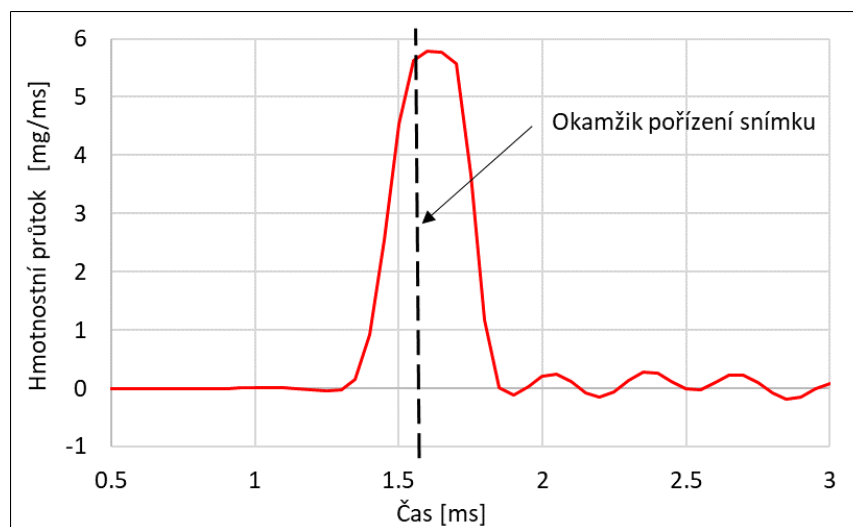
Obr. 26. Graf závislosti penetrace paprsků paliva na čase

9.3.5. Zhodnocení stavu vstřikovačů

Dle protokolu ze servisní stolice docházelo u vstřikovačů ke snížení vstřikovaných dávek při režimu nízkého zatížení a pilotní dávky a také k jejich variaci. V porovnání se servisní stolicí měření na vývojové stolici nepotvrdilo variaci dávek při jednotlivých režimech. Ovšem z měření ve vizualizační komoře bylo zjištěno, že vstřikovače mají značně zhoršené průtokové vlastnosti u jednoho z otvůrků. Otvůrek je do určitého časového okamžiku téměř neprůchodný. Tento jev byl objeven také u vstřikovače, který byl označen servisní stolicí za správně fungující. To znamená, že vstřikovač sice splňuje

kritéria vstřikovaných dávek, ale jeho nesymetrie délky paprsků bude mít zásadní vliv na spalování ve válci, a proto je nutná jeho oprava jako u všech ostatních vstřikovačů, které neprošly testem na servisní stolici.

Ve vztahu k závadě na vozidle lze konstatovat, že snímky z vizualizační komory potvrzují důvody kouřivosti vozidla. Z nesymetričnosti paprsků budou ve spalovacím prostoru vznikat zóny s bohatší směsí, které budou způsobovat zvýšenou tvorbu sazí. To se bude projevovat nejvíce při nižších tlacích a krátkých časových impulzech, což odpovídá režimu volnoběhu. Na Obr. 27. je zobrazen průběh vstřikování při délce impulzu 200 μ s. Zároveň je vyznačen časový okamžik, kdy byl pořízen snímek na Obr. 25. Z grafu Obr. 27 lze vidět, že snímek byl pořízen v době maximálního hmotnostního průtoku vstřikovačem. To znamená, že se jehla dále nezvedá, a tedy nemůže dojít k symetrizaci paprsků, čímž ve spalovacím prostoru budou vznikat bohaté zóny.



*Obr. 27. Průběh vstřikování paliva v čase
 (Délka impulzu 200 μ s, tlak v zásobníku 800 bar)*

9.4. Sada vstřikovačů 2

Základní informace týkající se vstřikovačů a vozidla u kterého byla diagnostikována závada jsou uvedeny v Tab. 4.

Výrobce vstřikovače	Bosch
Typ vstřikovače	CRI 2.1
Typové číslo	0445110188
Výrobní čísla měřených vstřikovačů	0986
Značka vozidla, Model vozidla	Mazda 3
Rok výroby vozidla	2007
Počet ujetých kilometrů	223 584 km
Zdvihový objem motoru	1,6 l
Výkon motoru	66 kW

Tab. 4. Základní informace o vstřikovačích Bosch CR2.1 a vozidle Mazda 3

9.4.1. Popis závady

Provozovatelem vozidla bylo vyzorováno, že motor má značně tvrdý chod v porovnání s předchozími roky provozu. Vozidlo bylo odvezeno do servisu, kde bylo potvrzeno, že motor má příliš hrubý chod při volnoběžných otáčkách. Dále bylo zjištěno, že při akceleraci dochází u motoru k zvláštnímu zvonivému zvuku, připomínající klepání dvou kovových předmětů o sebe.

9.4.2. Servisní stolice Bosch EPS945

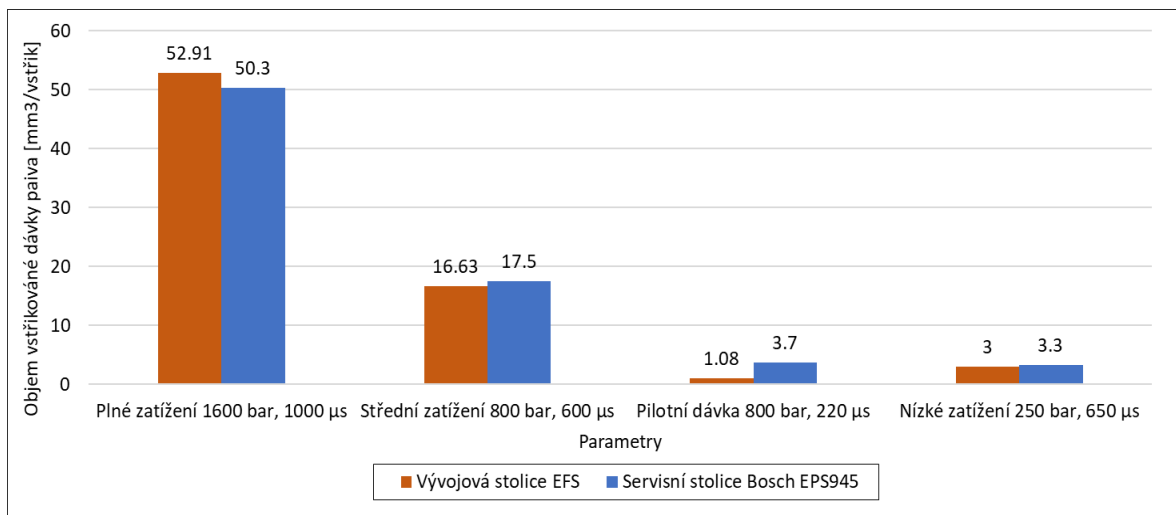
Z testu na servisní stolici Bosch bylo zjištěno, že všechny čtyři testované vstřikovače mají zvýšenou pilotní dávku paliva viz Tab. 5. V tabulce je uveden pouze jeden vstřikovač, protože u všech vstřikovačů, byla naměřena totožná hodnota.

S. Čís. Vstřikovače	Veličina	Tlak paliva	Délka pulzu	Min.	Max.	Naměřeno
0986	Objem dávky	800 bar	220 μ s	0,3	2,7	3,3 mm ³ /cyklus

Tab. 5. Hodnoty parametrů změřené servisní stolicí Bosch EPS945

9.4.3. Vývojová stolice EFS ITB 240 RC-V

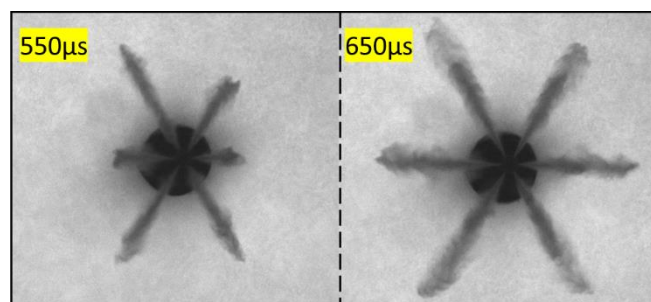
Pro měření na vývojové stolici byl určen pouze vstřikovač s výrobním číslem 0986, protože vzhledem k výsledkům ze servisní stolice se předpokládalo stejné provozní opotřebení všech vstřikovačů. Při měření vstřikovače na vývojové stolici bylo zjištěno, že změřená pilotní dávka paliva je ve srovnání se servisní stolicí třetinová viz Obr. 28. Během dalších měření bylo potvrzeno, že u časových impulzů kratších než 250 μs je na vývojové stolici naměřena výrazně nižší dávka než u servisních stolic. Proto z porovnávacího měření na vývojové stolici nelze potvrdit, že u vstřikovače dochází ke vstřiku zvýšené pilotní dávky.



Obr. 28. Porovnání změřených hodnot vstřikovaných dávek paliva vývojovou a servisní stolicí

9.4.3.1. Výsledky z vizualizační komory

Z měření ve vizualizační komoře bylo zjištěno velmi mírné opotřebení trysky vstřikovače, které se projevuje z počátku zdvihu jehly, kratší penetrační délkou dvou paprsků. Ovšem velmi rychle dochází k symetrizaci paprsků, a proto opotřebení trysky



Obr. 29. Porovnání paprsků paliva v časových okamžicích 550 μs a 650 μs od aktivace vstřikovače

s největší pravděpodobností nemá vliv na objevenou závadu motoru. Na obrázku lze pozorovat, že k symetrizaci došlo během 100 μ s.

9.4.4. Zhodnocení stavu vstřikovačů

Pro hodnocení stavu vstřikovače ve vztahu k závadě lze využít pouze data ze servisní stolice, jelikož z měření na vývojové stolici nelze konstatovat opotřebení vstřikovačů. Ovšem naměřené zvýšené pilotní dávky vstřikovačů, které byly naměřeny servisní stolicí Bosch přímo potvrzují důvody k hrubému chodu motoru a abnormálnímu akustickému projevu. Při zvýšení množství paliva u pilotní dávky dochází při spalování k rychlejšímu nárůstu tlaku ve spalovacím prostoru. To má za následek zvýšené vibrace a zvýšení hlučnosti motoru. Projevem je tudíž tvrdý chod motoru, jak tomu bylo u starších vznětových motorů, které nevyužívaly pilotní dávku paliva.

9.5. Sada vstřikovačů 3

Základní informace týkající se vstřikovačů a vozidla u kterého byla diagnostikována závada jsou uvedeny v Tab. 6.

Výrobce vstřikovače	Bosch
Typ vstřikovače	CRI 2.18
Typové číslo	0445110369
Výrobní čísla měřených vstřikovačů	1111,2509
Značka vozidla, Model vozidla	Volkswagen Touran
Rok výroby vozidla	2014
Počet ujetých kilometrů	268 539 km
Zdvihový objem motoru	2,0 l
Výkon motoru	110 kW

Tab. 6. Základní informace o vstřikovačích Bosch CR2.18 a vozidle Volkswagen Touran

9.5.1. Popis závady

Vozidlo bylo přivezeno do autoservisu s nepravidelným chodem motoru, u kterého na první pohled docházelo k výrazným vibracím. Zároveň na palubní desce byla rozsvícena kontrolka MIL.

9.5.2. Servisní stolice Bosch EPS945

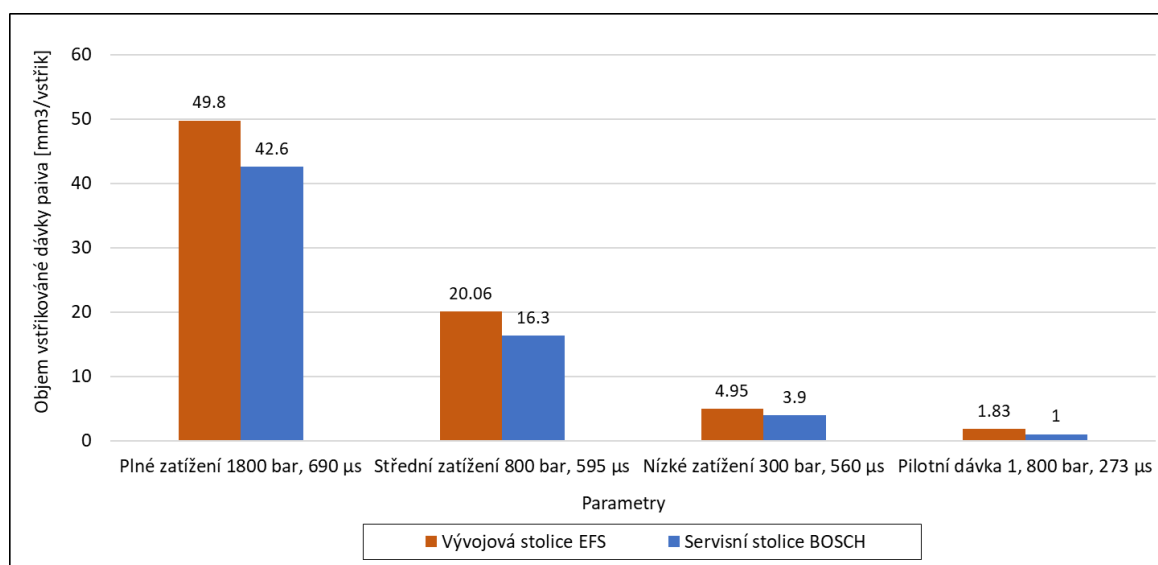
Po otestování vstřikovačů na servisní stoličce Bosch bylo zjištěno, že u všech vstřikovačů je dávka paliva, odpovídající maximálnímu zatížení, nižší oproti předepsaným hodnotám, jak je vidět v z Tab. 7. V tabulce je uveden pouze jeden vstřikovač, protože u všech změřených vstřikovačů, byly hodnoty dávky skoro totožné s rozdílem max. 0,4 mm³. Ostatní změřené dávky, odpovídající jiným zatížením, se vyskytovaly v předepsaných tolerancích.

S. Čís. Vstřikovače	Veličina	Tlak paliva	Délka pulzu	Min.	Max.	Naměřeno
2509	Objem dávky	1800 bar	690 μs	48	59,6	42,6 mm ³ /cyklus

Tab. 7. Hodnoty parametrů změřené servisní stolicí Bosch EPS945

9.5.3. Vývojová stolice EFS ITB 240 RC-V

K měření na vývojové stoličce byly vybrány dva vstřikovače s výrobními čísly 1111 a 2509. Z měření porovnávacího cyklu se servisní stolicí vyšly všechny změřené dávky vyšší

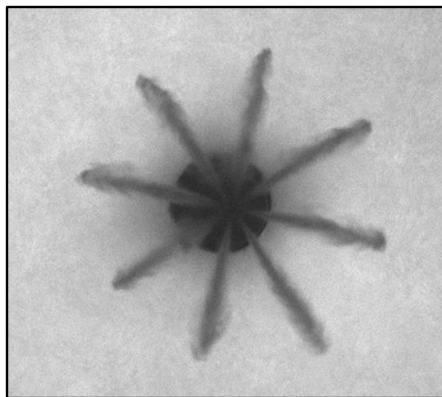


Obr. 30. Porovnání změřených hodnot vstřikovaných dávek paliva vývojovou a servisní stolicí Bosch

oproti měření na servisní stolicí. Vyšší dávka paliva byla také naměřena při testování pilotní dávky, což je neobvyklé v porovnání s předchozími zkušenostmi z měření, kde u ostatních vstřikovačů tomu bylo vždy naopak. Na Obr. 30 je zobrazeno porovnání změřených dávek vývojevou a servisní stolicí. Při měření celkové charakteristiky vstřikovače se neobjevily body, při kterých by vstřikovač vykazoval abnormální hodnoty naměřených parametrů, které by ukazovaly na závadu vstřikovače.

9.5.3.1. Výsledky z vizualizační komory

Oba vstřikovače byly také podrobeny měření ve vizualizační komoře. U vstřikovačů nebyla pozorována přílišná nesymetričnost délky paprsků a všechny paprsky měly podobný tvar bez větších deformací paprsku. To lze vidět na Obr. 31, kde jsou paprsky zachyceny v čase 550 μ s od aktivace vstřikovače.



*Obr. 31. Zobrazení vstřiku paliva
550 μ s po aktivaci vstřikovače*

9.5.4. Zhodnocení stavu vstřikovačů

Po otestování vstřikovačů na servisní stolicí bylo vyhodnoceno, že vstřikovače neplní správně svou funkci a je zapotřebí je vyměnit za nové.

V porovnání se servisní stolicí, měření na vývojevé stolicí ukázalo, že žádný z parametrů vstřikování nevykazoval hodnoty, které by poukazovaly na vadný vstřikovač. Také výsledky z vizualizační komory nepotvrdily přílišné provozní opotřebení trysky.

Dle výsledku ze servisní stolice bylo technikem rozhodnuto, že u vozidla dojde k výměně vstřikovačů za nové. Ovšem po montáži nových vstřikovačů vykazoval motor vozidla stejné chování jako se starými vstřikovači. Vozidlo bylo poté dále zkoumáno a

závada byla nalezena v opotřebovaných hydraulických zdviháčích, což mělo vliv na správnou funkci rozvodového mechanismu.

Lze tedy konstatovat, že u servisní stolice muselo dojít k systematické chybě měření, která podhodnocovala naměřené výsledky a vycházely naměřené dávky nižší oproti vývojové stolici. To se nejvíce projevilo na dávce paliva odpovídající plnému zatížení a vstřikovače byly nesprávně označeny za vadné.

9.6. Ostatní testované vzorky vstřikovačů

V rámci diplomové práce došlo k více než 30 měřením na 10 vzorcích vstřikovačů. Vstřikovače, u kterých byla získána kompletní historie i s diagnostickým závěrem závady vozidla, jsou uvedeny v této práci. Data z měření ostatních vzorků, které se do práce nevešly spolu s jejich vyhodnocením je uloženo do vzniklé databáze.

10. Modelové možnosti popisu vstřikovače

V současné době je při vývoji součástí spalovacích motorů stále více využíváno výsledků z matematických modelů, které jsou schopny predikovat například průběh teploty a tlaku ve spalovacím prostoru. Tyto hodnoty lze pak využít pro počáteční návrh součástí. Využitím matematických modelů se zásadně snižuje čas vývoje.

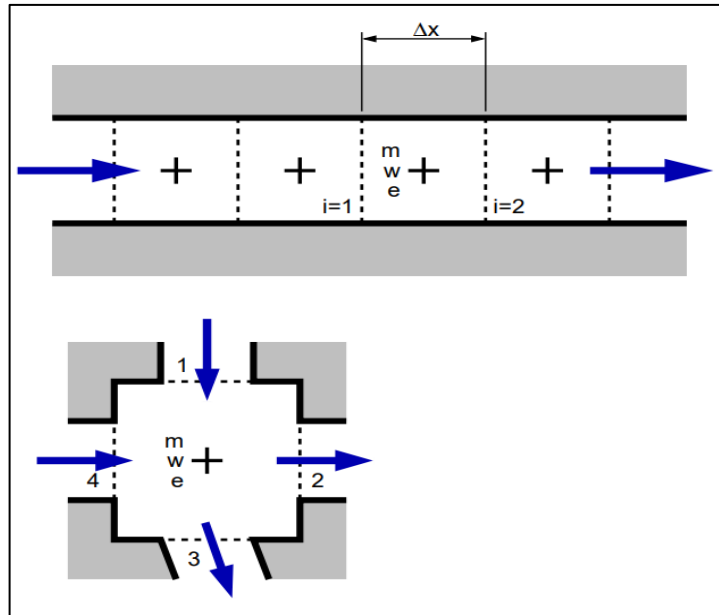
10.1. Matematický model vstřikovače

Tato kapitola stručně popisuje, jak by se dal matematickým modelem popsat elektromagnetický vstřikovač systému Common Rail. Za účelem modelování se využívá řada výpočetních nástrojů, přičemž v této kapitole bude popsáno zjednodušené modelování pomocí 1D přístupu, což umožňuje například software GT-Suite.

Matematický model vstřikovače se v tomto případě skládá ze dvou hlavních modelů: z modelu proudění a z modelu dynamiky mechanických částí. Detailnější modely mohou být doplněny o elektrickou a magnetickou část týkající se ovladacího ventilu vstřikovače. Kombinací těchto modelů jsou pak vypočteny všechny parametry týkající se vstřikování.

10.2. Modelování proudění

Tento model se týká všech součástí, které jsou hydraulicky aktivní. To znamená všechny prostory a šterbiny vstřikovače, kterými proudí palivo a dále přivodní potrubí. Tyto části vstřikovače jsou pak aproximovány pomocí jednorozměrných či bezrozměrných matematických modelů. U prvků, které mají jeden hlavní rozměr mnohonásobně větší než ostatní, jako jsou kanály uvnitř vstřikovače či přivodní potrubí, se používají jednorozměrné modely. U ostatních prvků, jakou je například prostor pod jehlou či prostor řídicího servomechanismu se modelují bezrozměrným modelem. Při aproximaci se celkový objem deskretizuje (rozdělí) na jednotlivé konečné objemy, jak je vidět na Obr. 32. V každém vytčeném objemu lze popsat jednorozměrné proudění třemi bilančními rovnicemi. Jedná se o bilance hmoty, hybnosti a energie. Dané rovnice jsou pak numericky řešeny.



Obr. 32. Nahrazení prvků vstřikovače v modelu[26]

10.2.1. Mechanický model

Tento model řeší dynamiku pohybu jehly a všech ostatních pohybujících se částí jako tlačná tyčka nebo kotva solenoidu. Dynamika pohybu je řešena pomocí pohybové rovnice. Do této rovnice vstupují jednotlivé hmoty součástí a síly způsobené tlakem paliva a deformací pružin.

10.3. Využití numerického modelu pro predikci opotřebení vstřikovače

V kontextu této práce je zajímavé využít matematický model spíše k predikci postupného opotřebení vstřikovače v čase. Otázkou je, jakým způsobem v numerickém modelu toto postupné opotřebení zohlednit. Jedním ze způsobů je implementace korekční funkce, která bude řídit vybraný vstupní parametr. Korekční funkce reprezentuje postupnou změnu parametru vstřikovače, který se vlivem opotřebení v čase mění. Takovým parametrem může být snižování rychlosti zdvihu jehly, což lze například modelovat postupnou změnou viskozity, nebo snižováním vůle ve vedení jehly. Počáteční hodnota parametru je pak měněna v závislosti na korekční funkci vyplývající z měření. Proto je nutné u těchto vybraných parametrů znát, jak se budou v čase měnit.

10.4. Zhodnocení využití matematického modelu

V rámci této diplomové práce nebylo možné vytvořit dostatečně přesný prediktivní matematický model, ze kterého by se daly porovnat vypočtené hodnoty s výsledky získanými experimentem. Prvním důvodem, proč tento model nevznikl, byl nedostatek zásadních informací ohledně konstrukce vstřikovačů nutných pro stavbu modelu. Zároveň je pro tvorbu validního výpočetního modelu nutné mít k dispozici dostatečně velký soubor naměřených dat, který by posloužil k naladění a verifikaci modelu. V průběhu práce se však ukázalo, že získat takové množství dat by obnášelo roky měření.

11. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumání možnosti využití vývojové stolice EFS, která je součástí laboratoře vstřikování CVUM ve VTP Rožtoky, k posouzení provozního opotřebení elektromagnetických vstřikovačů systému Common-Rail. V dalším kroku pak porovnání vývojové stolice EFS se servisními stolicemi, které jsou využívány v praxi. Dalším bodem bylo pomocí naměřených parametrů ze stolic zhodnotit stav provozního opotřebení vstřikovačů a jeho vliv na chování motoru v běžném provozu. Na závěr, za předpokladu dostatku dat z měření, se poté pokusit získané výsledky využít v matematických modelech.

V úvodní teoretické části práce je popsán historický vývoj vznětového motoru, jeho emisní chování, a také popis vývoje legislativy týkající se emisí. To vše má za úkol vysvětlit, co vedlo k současné dominanci využití vstřikovacího systému CR u osobních vozidel. Teoretická část se dále věnuje popisu vstřikovacího systému CR, a zvláště pak popisuje vstřikovač s elektromagnetickým řídicím ventilem a princip jeho funkce. Jako poslední jsou uvedeny příčiny vzniku provozního opotřebení a jeho vliv na chování motoru.

Praktická část práce se zabývá experimentálním měřením sad vstřikovačů demontovaných z vozidel, u kterých bylo podezření na provozní opotřebení vstřikovačů. Ty byly nejdříve podrobeny měření na servisní stolicí, ze kterého vzešel protokol s naměřenými parametry a informace o stavu vstřikovače. Následně byly změřeny na vývojové stolicí EFS.

V rámci praktické části bylo zapotřebí vytvořit celkovou databázi proměřených vstřikovačů. Ta slouží k uspořádání dat z jednotlivých měření a zjednodušení přístupu k naměřeným datům. Jako její součást byl vytvořen program pro zpracování dat ze stolice EFS, který urychluje práci s daty a vyhodnocení výsledků. Tento program lze pak dále v budoucnu využívat pro práci s daty z vývojové stolice EFS.

Porovnat naměřené hodnoty přímo mezi vývojovou stolicí a servisními stolicemi nelze, jelikož se při měření nevyužívá stejné přívodní potrubí do vstřikovače, a není znám ani přesný průběh řídicího proudu ovládající vstřikovač, který využívají servisní stolice. Byly proto zpracovány dvě citlivostní analýzy na zmíněné parametry. Při zkoumání citlivosti na různé přívodní potrubí posloužily tři různé způsoby připojení vstřikovače. Bylo zjištěno, že změnou přívodního potrubí sice dochází ke změně vstřikované dávky paliva, ovšem rozdíly ve změřených dávkách pro jednotlivá potrubí se pohybovaly v řádech

jednotek procent. Při hodnocení citlivosti na tvar řídicího proudu se zjistilo, že hlavním parametrem ovlivňujícím velikost dávky paliva je hodnota aktivačního proudu vstřikovače, a následná hodnota přídržného proudu už nemá na vstřikovanou dávku vliv. Zvýšením hodnoty aktivačního proudu dochází k dřívějšímu a rychlejšímu zdvihu jehly ze sedla. To má nejzásadnější vliv na pilotní dávku paliva, kde vzhledem ke krátké době má rychlost otevírání zásadní vliv. Např. při zvýšení aktivačního proudu z 18 A na 20 A se pilotní dávka zdvojnásobí.

Při porovnání vývojové stolice se servisními stolicemi bylo zjištěno, že při měření pilotních dávek s časem aktivace do 250 μ s jsou naměřené hodnoty vývojovou stolicí výrazně nižší oproti hodnotám naměřenými servisními stolicemi. Je pravděpodobné, že při měření pilotních dávek se dostávám na hranici měřicího rozsahu stolice a v této oblasti má vývojová stolice tendenci podhodnocovat naměřené výsledky.

Hlavní výhodou vývojové stolice je možnost využití vizualizační komory. Díky pořízeným snímkům lze zjistit provozní opotřebení vstřikovacích otvůrků. Vstřikovač tak může být vyhodnocen jako vadný, i když má dle servisní stolice velikosti vstřikovaných dávek v toleranci. Další výhodou vývojové stolice oproti servisním stolicím je její schopnost změřit průběh hmotnostního průtoku vstřikovacími otvůrkou v čase, ovšem vyhodnotit provozní opotřebení z tvaru křivky je bez srovnání s neopotřebovaným vstřikovačem nemožné. Průběh vstřikování lze například využít při porovnání s matematickým modelem.

V rámci této diplomové práce nebylo možné vytvořit dostatečně přesný prediktivní matematický model, ze kterého by se vypočtené hodnoty s výsledky získanými experimentem daly porovnat. Pro stavbu matematického modelu je zapotřebí znát kompletní konstrukční parametry vstřikovače, ale informace o nich jsou obchodním tajemstvím, a tudíž je nelze získat. Vytvoření takového fungujícího modelu ovšem nebylo cílem práce; jako hlavní úkol si stanovila prozkoumání možností využití dat z experimentu pro matematické modelování. Největším potenciálem získaných dat je jejich implementace do korekčních funkcí, které by charakterizovaly změnu parametrů vstřikovače v čase vlivem provozního opotřebení. K vytvoření takových funkcí je ovšem zapotřebí získat mnohonásobně větší objem dat, než který se podařilo získat v rámci této diplomové práce. Potenciál proto vidím v rozšiřování vzniklé databáze, které bude v budoucnu sloužit jako důležitý zdroj informací pro matematické simulace.

Použitá literatura

- [1] Mercedes-Benz 260 D [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/mercedes-benz-260-d-byl-prvnim-seriovym-osobnim-autem-s-naftovym-motorem-132881>
- [2] Rudolf Diesel a jeho geniální vynález [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/rudolf-diesel-a-jeho-genialni-vynalez-21002623>
- [3] Zlaté časy nafty skončily [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.diesel-gate.cz/clanky/zlate-casy-nafty-skoncily-evropane-na-ni-zanevrel-nejen-kvuli-dieselgate>
- [4] Katalog,Škoda Octavia [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: https://www.skoda-auto.cz/_doc/22e810a3-531e-4715-8a9c-76192b50232a
- [5] HEYWOOD, John B. Internal combustion engine fundamentals. Second edition. New York: McGraw-Hill Education, [2018]. ISBN 978-126-0116-106.
- [6] Spalovací motory I. Druhé vydání. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-800-1036-181.
- [7] TAKÁTS, Michal. *Měření emisí spalovacích motorů*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 8001016323
- [8] Vývoj emisních norem [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>
- [9] Nařízení Evropského parlamentu a rady (EU) 2019/631 [online]. [cit. 2022-06-30]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0631&from=ES>
- [10] WLTP: Nové standardy pro spotřebu [online]. [cit. 2022-06-28]. Dostupné z: <https://www.volkswagen.cz/znacka-a-technologie/wltp>
- [11] WLTP a RDE [online]. [cit. 2022-06-17]. Dostupné z: <https://www.fiat.cz/test-wltp>
- [12] Metodický postup měření emisí vozidel [online]. [cit. 2022-06-030]. Dostupné z: https://www.mdcr.cz/getattachment/Dokumenty/Ministerstvo/Vestniky-dopravy/Vestniky-dopravy-2020/Vestnik-dopravy-13-2020/Priloha-k-Instrukci-c-7-2020-Metodicky-postup-mereni-emisi-vozidel-12_2020.pdf.aspx
- [13] Diesel Fuel-Injection System Common-Rail. Second edition. Bosch Technical Instruction. Robert Bosch GmbH. Postfach 1129, D-73201 Plochingen, 2003.

- [14] Diesel Injection pump CP4 [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://injectionpumps.co.uk/product/seal-repair-kit-for-bosch-cp4-common-rail-pumps-single-element/>
- [15] Crua, Cyril & Heikal, M.R.. (2014). Time-resolved fuel injector flow characterisation based on 3D laser Doppler vibrometry. *Measurement Science and Technology*. 25. 125301. 10.1088/0957-0233/25/12/125301
- [16] Ullmann, J., Geduldig, M., Stutzenberger, H., Caprotti, R. et al., "Investigation into the Formation and Prevention of Internal Diesel Injector Deposits," SAE Technical Paper 2008-01-0926, 2008
- [17] Birgel, A., Ladommatos, N., Aleiferis, P., Zülch, S. et al., "Deposit Formation in the Holes of Diesel Injector Nozzles: A Critical Review," SAE Technical Paper 2008-01-2383, 2008
- [18] Motorová nafta [online]. [cit. 2022-07-01]. Dostupné z: <https://www.cappo.cz/caste-dotazy/dotazy/motorova-nafta-a-bioslozky>
- [19] Why is the Check Engine Light On in My Audi? [online]. [cit. 2022-04-30]. Dostupné z: www.auditmecula.com/service/audi-check-engine-lights.html
- [20] Fuel Injector Symptoms [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.injectorrx.com/fuel-injector-cleaning-and-flow-testing-service/fuel-injector-symptoms>
- [21] 5 common symptoms of faulty diesel fuel injectors [online]. [cit. 2022-07-11]. Dostupné z: <https://gemstatediesel.com/5-common-symptoms-of-faulty-diesel-fuel-injectors/>
- [22] SPRAY VISUALISATION TEST SYSTEM EFS 8578: Installation Manual. Montagny, France, 2013.
- [23] Cost of diagnosing the P0266 code [online]. [cit. 2022-07-09]. Dostupné z: <https://www.yourmechanic.com/article/p0266-obd-ii-trouble-code-cylinder-2-contribution-balance-fault-by-andrew-quinn>
- [24] WRIGHT, Gus. *Fundamentals of Medium/Heavy Duty Diesel Engines*. Jones & Bartlett Publishers, 2015. ISBN 9781284067057.
- [25] CRD (Bosch) solenoid injector circuit current [online]. [cit. 2022-06-23]. Dostupné z: <https://www.picoauto.com/library/automotive-guided-tests/bosch-current-at-idle/>
- [26] DIVIŠ, MACEK. Hydrodynamické výpočty akumulárního vstřikovacího zařízení: Model vstřikovače. Výzkumná zpráva č. Z 08-07. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2008



- [27] Verteilereinspritzpumpe [online]. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://de-academic.com/dic.nsf/dewiki/1458707>
- [28] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Avid, 2008. ISBN 9788087143087
- [29] Diesel In-Line Fuel-Injection Pumps: Bosch Technical Instruction. Robert Bosch GmbH. Postfach 1129, D-73201 Plochingen, 2003. ISBN 9780837611020
- [30] Distributor Type Diesel Fuel Injection Pumps: Bosch Technical Instruction. Robert Bosch GmbH. Postfach 1129, D-73201 Plochingen, 2003. ISBN 9780837611037
- [31] Diesel Fuel-Injection Systems, Unit Injector System and Unit Pump System: Bosch Technical Instruction. Robert Bosch GmbH. Postfach 1129, D-73201 Plochingen, 2006. ISBN SBN 9780837606156

Seznam obrázku

Obr. 1. Konstrukce prvního sériově vyráběného vznětového motoru[1].....	10
Obr. 2. Vliv přebytku vzduchu na podíl škodliviny ve spalínách[6].....	12
Obr. 3. Ilustrace tvorby NO ve válci motoru[7]	13
Obr. 4. Vývoj emisních norem[8].....	15
Obr. 5. Jízdní cyklus WLTP[11].....	16
Obr. 6. Popis vstřikovacího systému Common-Rail [13].....	18
Obr. 7. Řez vysokotlakým radiálním pístovým čerpadlem CP4 od firmy Bosch[14]	20
Obr. 8. Popis vysokotlakého zásobníku (railu)[13]	20
Obr. 9. Řez vstřikovačem Bosch CRI2 s elektromagnetickým řídicím ventilem [15].....	21
Obr. 10. Zobrazení funkce elektromagnetického ventilu[13].....	22
Obr. 11. Profil řídicího proudu procházejícího vinutím elektromagnetu (a)-(c) Oblast otevíracího proudu, (d) Oblast přídržného proudu, (e) Ukončení průchodu proudu [13]	24
Obr. 12. Zobrazení kontrolky MIL[19]	27
Obr. 13. Servisní stolice od výrobce Hartridge	32
Obr. 14. Měřicí stolice EFS ITB RC-V[22].....	33
Obr. 15. Spodní pohled do vstřikovací komory, zobrazení paprsků v různých fázích vstřiku	35
Obr. 16. Průběh hmotnostního průtoku v závislosti na čase při velikosti vstřikovacího tlaku 1600 bar .	38
Obr. 17. Závislost délky vstřikování na délce impulsu při vstřikovacích tlacích 400 bar a 1600 bar.	39
Obr. 18. Závislost objemu vstřikované dávky paliva na délce impulsu.....	41
Obr. 19. Zachycený paprsek: (a) před zpracováním, (b) po zpracování programem SprayAnalyser	45
Obr. 20. Zobrazení pravděpodobnosti výskytu paprsků paliva v komoře na základě 10 provedených vstřiků	46
Obr. 21. Vliv provedení vstupního vysokotlakého vedení na hmotnostní průtok vstřikovačem.....	48
Obr. 22. Vliv přívodního potrubí na vstřikovanou dávku paliva	49
Obr. 23. Vliv otevíracího proudu na dávku paliva.....	50
Obr. 24. Graf závislosti otevíracího proudu na průběh vstřikování. Nastavené vstupní parametry: tlak: 800 bar, délka impulsu: 160 μ s.....	51
Obr. 25. Porovnání vstřikovače 1103 a 1207.....	53
Obr. 26. Graf závislosti penetrace paprsků paliva na čase	54
Obr. 27. Průběh vstřikování paliva v čase (Délka impulsu 200 μ s, tlak v zásobníku 800 bar).....	55
Obr. 28. Porovnání změřených hodnot vstřikovaných dávek paliva vývojovou a servisní stolicí.....	57
Obr. 29. Porovnání paprsků paliva v časových okamžicích 550 μ s a 650 μ s od aktivace vstřikovače	57
Obr. 30. Porovnání změřených hodnot vstřikovaných dávek paliva vývojovou a servisní stolicí Bosch	59
Obr. 31. Zobrazení vstřiku paliva 550 μ s po aktivaci vstřikovače	60
Obr. 32. Nahrazení prvků vstřikovače v modelu[26]	63

Seznam tabulek

Tab. 1. Měřené parametry.....	34
Tab. 2. Základní informace o vstřikovačích Bosch CR1 a vozidle Audi A8	52
Tab. 3. Hodnoty parametrů změřené servisní stolicí Hartridge CRi-PC	53
Tab. 4. Základní informace o vstřikovačích Bosch CR2.1 a vozidle Mazda 3	56
Tab. 5. Hodnoty parametrů změřené servisní stolicí Bosch EPS945.....	56
Tab. 6. Základní informace o vstřikovačích Bosch CR2.18 a vozidle Volkswagen Touran	58
Tab. 7. Hodnoty parametrů změřené servisní stolicí Bosch EPS945.....	59

Seznam příloh

Příloha 1: Vysokotlaké vstřikovací systémy	I
Příloha 2: Vstřikovač ovládaný piezoelektricky.....	VI
Příloha 3: Protokol ze servisní stolice Hartridge CRi-PC.....	VIII
Příloha 4: Ukázka databáze a programu na zpracování dat.....	IX

Použité zkratky a symboly

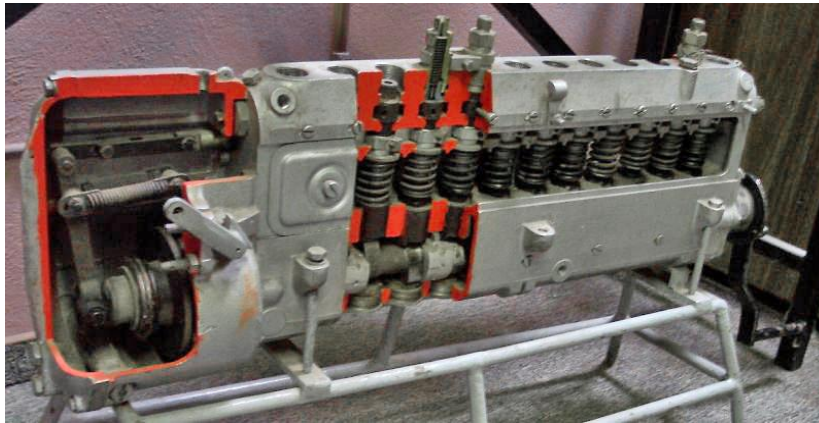
Označení	Popis	Jednotka
CR	Common-Rail	
EU	Evropská unie	
NEDC	New European Driving Cycle	
WLTP	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedures	
WLTC	World Harmonized Light Vehicle Duty Test Cycle	
RDE	Real Driving Emission	
OBD	On-Board Diagnostic	
MIL	Mulfunction Indicator Light	
DTC	Diagnostic Trouble Code (Diagnostické chybové kódy)	
CVUM	Centrum vozidel udržitelné mobility	
\dot{V}	Objemový průtok paliva zpětným vedením	[l/min]
V	Objem paliva za jeden vstřík	[mm ³ /vstřík]
f	Frekvence vstřikování	[vstřík/s]

*neuvedené zkratky a symboly jsou vysvětleny přímo v textu

Příloha 1: Vysokotlaké vstřikovací systémy

Řadové vstřikovací čerpadlo

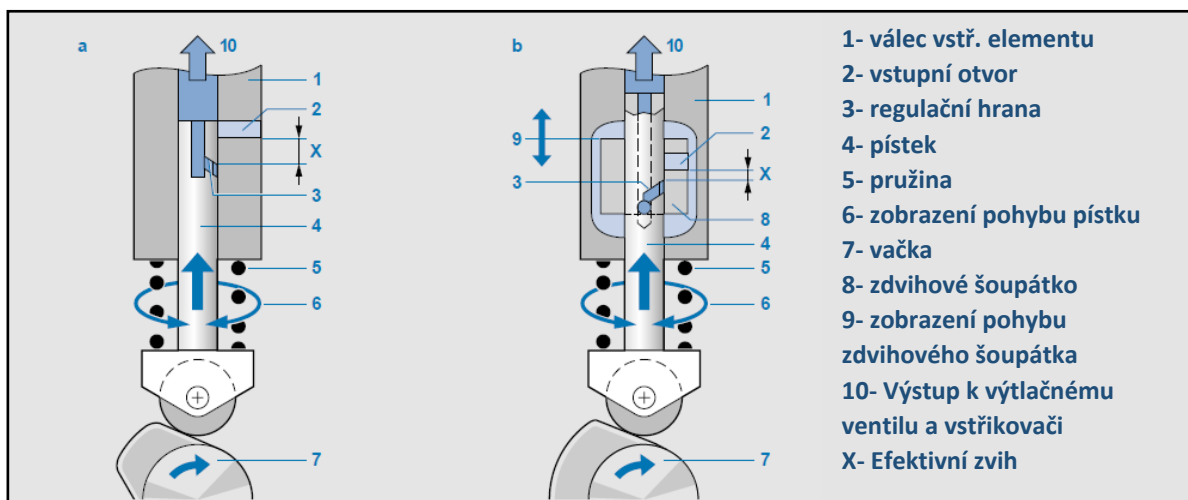
Tato čerpadla dostala svůj název proto, že elementy stlačující palivo na vysoký tlak jsou uspořádány do řady. Jak lze vidět na Obr.1. Každému válci tak připadá jeden vstřikovací element na jeden válec motoru. K elementům jsou pak připojena vysokotlaká



Obr.1. Řadové vstřikovací čerpadlo[27]

potrubí a vstřikovače. Jednotlivé komponenty vstřikovacího elementu jsou vyobrazeny na obrázku

č. 2. Pístky čerpadla jsou poháněny vačkovou hřídelí. Při pohybu pístku směrem vzhůru je stlačováno palivo. Zvyšováním tlaku dochází nejdříve k otevření výtlačného ventilu a poté ke zdvihu jehly vstřikovače a dochází ke vstřiku paliva. Velikost vstřikovací dávky je dána v závislosti na efektivním zdvihu pístku. V těle pístku je vytvořena tzv. regulační hrana (šikmý kanál), která je spojena s prostorem na pístkem. Jakmile dojde k překrytí regulační hrany a vstupního otvoru, dojde k uvolnění tlaku paliva v prostoru na pístkem, a tedy



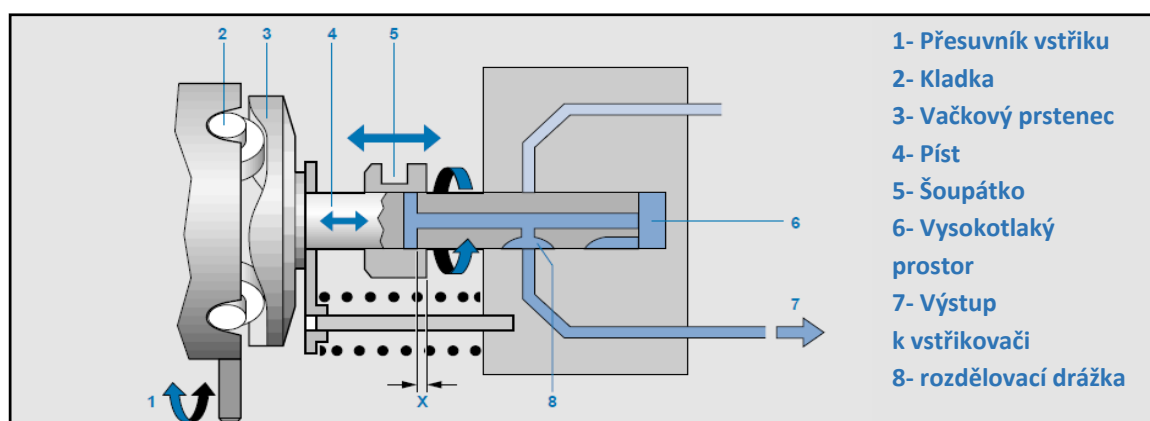
Obr.2. Vstřikovací elementy řadových čerpadel. (a) Klasická konstrukce, (b) Se zdvihovým šoupátkem[29]

k zavření vstřikovače a ukončení vstřikovací dávky. Pístek se může pomocí prstence vůči válci otáčet, a tak dochází ke změně časového intervalu, kdy je vstupní otvor zakrytý, čímž se řídí velikost vstřikované dávky. U klasického provedení čerpadla je počátek vstřiku řízení tzv. přesuvníkem. Přesuvník je zařízení, které automaticky dovolí úhlové posunutí vačkové hřídele čerpadla oproti klikové hřídeli. V konstrukčním řešení se zdvihovými šoupátky, se řídí počátek vstřiku posunutím šoupátka. Vzhledem k tomu, že první čerpadla vznikla už okolo roku 1930, není jejich konstrukce příliš složitá a není dosahováno natolik přesných výrobních tolerancí jak u současných čerpadel. Proto u nich dochází k pomalejšímu provoznímu opotřebení oproti novějším vstřikovacím systémům. Řadová čerpadla tak vynikají svou spolehlivostí a nenáročnou údržbou či opravou.[28] [29]

Rotační vstřikovací čerpadla

Axiální rotační čerpadlo

Tato čerpadla našla uplatnění u malých rychloběžných vznětových motorů. V porovnání se řadovým čerpadlem pro stejný výkon motoru vychází rotační čerpadla lehčí, menší a výrobně levnější. Na Obr.3. je popis vnitřní části čerpadla. Rotační čerpadlo má pouze jeden výtlačný element, společný pro všechny válce, vytvářející vstřikovací tlak. Pístek koná zároveň rotační a přímočarý vratný pohyb. K pístku je připojen prstenec s axiálními vačkami. Hřídel pístku je poháněna přes řemen či řetěz od klikového hřídele.



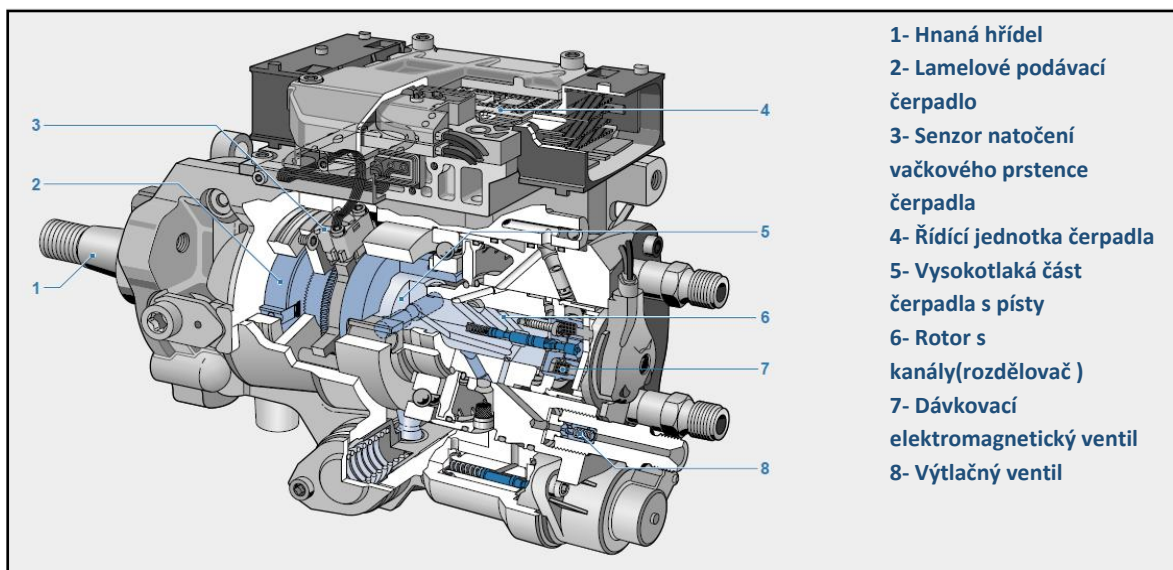
Obr.3. Popis axiálního rotačního vstřikovacího čerpadla[30]

Hřídel čerpadla se otáčí polovičními otáčkami oproti otáčkám klikové hřídele. Součástí vstřikovacího čerpadla je integrované lamelové podávací čerpadlo, které dopravuje palivo kanálem do prostoru pod píst. Pístek neslouží pouze jen ke stlačování paliva, ale funguje také jako distributor. Na pístku je vytvořená rozdělovací drážka, která je spojena kanálem

s prostorem nad pístkem. V prostoru nad pístkem je vzhledem k axiálnímu pohybu stlačováno palivo. Vlivem rotace pístku, pak dochází k překrytí rozdělovací drážky a kanálu vedoucího a palivo o vysokém tlaku proudí, přes výtlačný ventil, ke vstřikovači. Vstřikovací dávka je řízena pomocí šoupátka. Šoupátko má tvar prstence, který zakrývá a odkrývá kanál spojující nízkotlaký vnitřní prostor čerpadla s vysokotlakým prostorem nad pístkem. Doba zakrytí výstupního kanálu nám určuje vstřikovanou dávku paliva. Axiálním pohybem šoupátka vůči pístku pak tedy dochází k regulaci vstřikované dávky paliva do válce. Pohyb šoupátka může být řízen mechanicky (starší verze) nebo elektronicky. Změna načasování vstřiku je řízena pomocí hydraulicky ovládaného prstence s kladkami tzv. přesuvníku vstřiku. Úhlovým pootočením prstence proti směru otáčení se pak zajistí dřívější vstřik paliva, který je nutný při vyšších otáčkách motoru, protože na tvorbu směsi je méně času. Mazání vnitřních komponent čerpadla je pomocí paliva. Rotační čerpadla jsou známa svou vysokou spolehlivostí. [30]

Radiální rotační čerpadlo

Radiální rotační čerpadlo pracuje na podobném principu jako čerpadlo s pístem umístěným axiálně. Hlavním rozdílem je způsob vytváření vstřikovacího tlaku paliva. Ten je vytvářen pomocí radiálně umístěných pístů, které stlačují palivo na požadovaný tlak. Podle počtu válců motoru se také liší počet pístů uvnitř čerpadla. Popis čerpadla je na Obr. 4. Písty jsou umístěny v rotoru vstřikovacího čerpadla a pohybují se tedy rotačně



Obr.4. Řez radiálním rotačním čerpadlem Bosch VR [30]

zároveň s rotorem. Při otáčení rotoru dochází k přímočarému vratnému pohybu pístů, který je způsobem dotykem pístů s vačkovým prstencem na obvodu. Vačkový prstenec je tvořen počtem vyoblení odpovídající počtu válců motoru. Prstenec je pákově spojen s přesuvníkem vstřiku a může se úhlově posouvat vůči skříni čerpadla. Úhlové posunutí je závislé na tlaku paliva dodávaného podávacím čerpadle, který je přímo úměrný otáčkám motoru. Tímto způsobem je řízeno časování dávky paliva. Novější elektronicky řízená čerpadla jsou navíc korigována elektromagnetickým ventilem přesuvníku. V rotoru čerpadla vyrobena je osově vyvrtán kanál, kterým přichází palivo do vysokotlakého prostoru pod písty. Do osového kanálu jsou radiálně navrtány vtokové kanály a výstupní kanál ke vstřikovačům. Vtokové kanály jsou rovnoměrně umístěná po obvodu a jejich počet odpovídá počtu válců motoru. Překrytím výstupního kanálu a kanálu vedoucího ke vstřikovači se zajistí distribuce paliva k jednotlivým válcům. Velikost dávky je řízena pomocí dávkovacího ventilu, který může být ovládán mechanicky nebo u novějších typů čerpadel elektromagneticky. [30]

Sdružená vstřikovací jednotka (UIS - Unit Injector System)

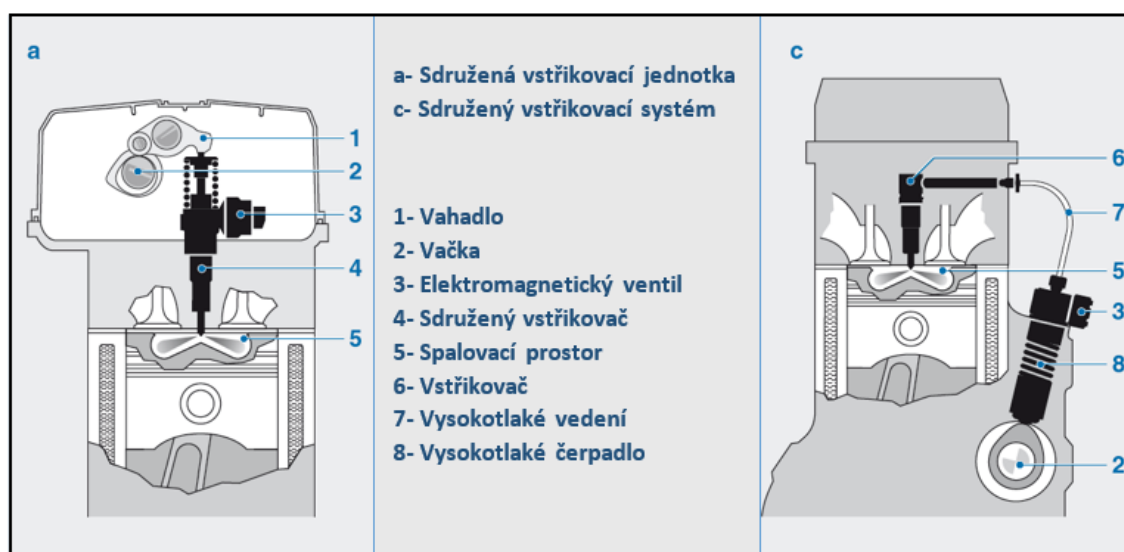
Specifikum vstřikovacího systému sdružené vstřikovací jednotky je, že vysokotlaké čerpadlo a vstřikovač jsou sdruženy do společné vstřikovací jednotky. Na každý válec tak připadá jedna vstřikovací jednotka. Na rozdíl od ostatních systémů zde nenalezneme žádné vysokotlaké potrubí ani čerpadlo. Vstřikovací jednotky jsou umístěny v hlavě motoru, palivo k nim je přiváděno kanály v hlavě motoru.

Skladba vstřikovací jednotky a její porovnání se sdruženým vstřikovacím systémem je na Obr.5. Palivo je stlačováno pístkem, který je uváděn do pohybu pomocí přídavné vačky, která je součástí vačkového hřídele motoru. Tento vstřikovací systém proto obvykle najde u motoru s uspořádáním OHC. Vstřik dávky paliva je řízen elektronicky pomocí elektromagnetického ventilu, který otevírá a zavírá vstup do zpětného vedení paliva. Pokud má dojít ke vstřiknutí paliva, musí dostat elektromagnetický ventil signál od řídicí jednotky motoru. Po obdržení elektrického signálu elmag. ventil uzavírá zpětné vedení paliva a pod jehlou trysky se začíná vytvářet tlak, který je vytvářen translačním pohybem pístku. K otevření trysky dochází ve chvíli, kdy tlak paliva pod jehlou přesáhne sílu pružiny, která tlačí jehlu do sedla. K ukončení vstřiku paliva dochází v okamžiku kdy elmag. ventil přestává být buzen a otevírá se zpětné vedení paliva. Tlak vytvořený pístkem

uniká do zpětného vedení a síla pružiny přitlačí jehlu do sedla trysky. Vzhledem k absenci vysokotlakého vedení je systém dosáhnout tlaků až 220 MPa. Tento systém také umožňuje využít tzv. pilotní dávku, která je jen zlomkem vstřikovací dávky a je vstříknuta před hlavní dávkou. To způsobí, že nedojde k tak rapidnímu nárůstu tlaku ve spalovacím prostoru, jako v případě vstříknutí pouze hlavní vstřikovací dávky. Motor se tak stává méně hlučným a emisně čistším. Nevýhodou systému je, že je poháněn vačkovou hřídelí, tzn. že časování a tlak vstřikovaného paliva je závislý na otáčkách motoru. [31]

11.1. Sdružený vstřikovací systém (UPS – Unit Pump System)

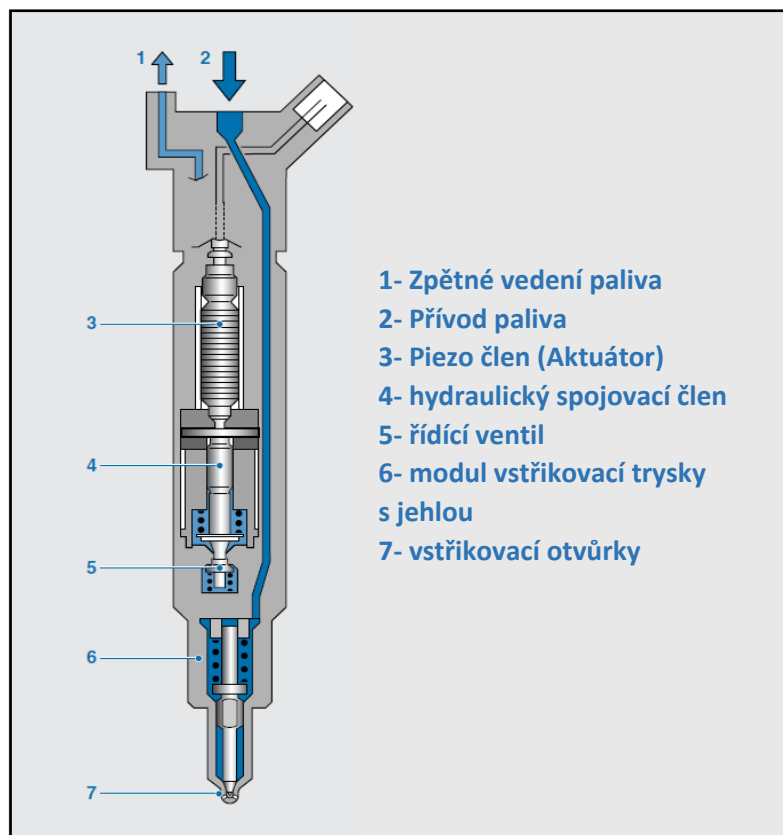
Můžeme se setkat také s označením PLD z německého Pump Leitung Düse. Sdružený vstřikovací systém je velmi podobný systému se sdruženou vstřikovací jednotkou. Jako u sdružené vstřikovací jednotky připadá jedno vysokotlaké čerpadlo na každý jednotlivý válec a jsou poháněna od vačkového hřídele. Hlavní konstrukční rozdíl spočívá v tom, že mezi vstřikovač a vysokotlaké čerpadlo je umístěno krátké vysokotlaké vedení. To umožňuje využití systému u motorů s rozvodovým uspořádáním OHV. Časování vstřikovací dávky a její velikost je jako u systému UIS řízeno elektronickou řídicí jednotkou prostřednictvím elektromagnetického ventilu umístěném na každém vstřikovacím čerpadle. Tento systém byl využíván u nákladních vozidel kvůli jeho kompaktnosti a jednoduché servisovatelnosti.



Obr.5. Porovnání konstrukce Sdružené vstřikovací jednotky (a) a Sdruženého vstřikovacího systému(c)[31]

Příloha 2: Vstřikovač ovládaný piezoelektricky

Podle názvu vstřikovače již vyplývá, že využívá piezoelektrického jevu. Piezoelektrický jev je vlastnost krystalů či speciální piezoelektrické keramiky, kdy při jejich deformaci se generuje elektrické napětí. U vstřikovače je využito opačného jevu, kdy při přivedení napětí na okraje krystalu je dochází u krystalu k deformaci. Konstrukce vstřikovače je zobrazena na Obr. 1.

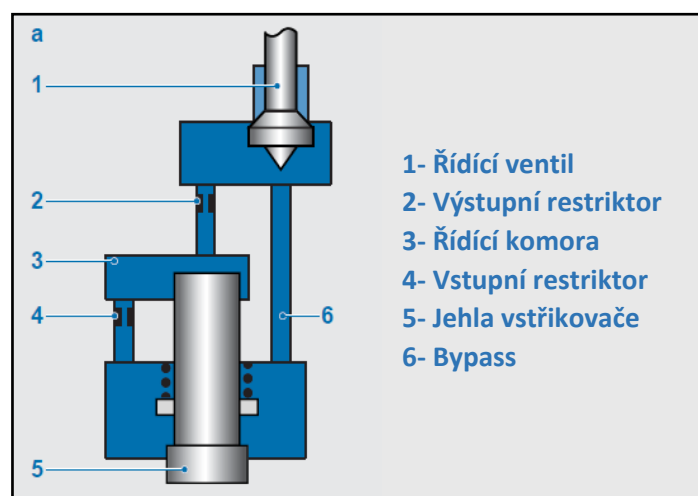


Obr. 33. Konstrukce Piezoelektrického vstřikovače[13]

Princip funkce piezoelektrického vstřikovače

Stejně jako u elektromagnetického vstřikovače zde není pevná vazba mezi ovládacím krystalem a jehlou trysky. Mezi těmito členy se nachází: Hydraulický spojovací člen (4) a řídicí ventil (5). Aby došlo ke vstřiku paliva, tedy zvednutí jehly musí dojít k těmto krokům. Řídicí jednotka podle tlaku v zásobníku a pracovního bodu vypočítá aktivační napětí, které je přivedeno k piezoelektrickému členu. Hodnota napětí se pohybuje od 110-140V. Piezoelektrický člen se začne rozpínat v axiálním směru a působit

na hydraulický spojovací člen. Jeho úkolem je znásobit zdvih jehly oproti piezo členu a kompenzovat vliv teplotní roztažnosti vlivem měnící se teploty paliva. Šoupátku hydraulického spojovacího členu je spojeno s řídicím ventilem. Vzhledem k tomu že rozpínání, a tedy i zdvih piezo členu je v opačném směru, než se požaduje po jehle. Existuje zde systém velmi podobný jako u elektromagnetického vstřikovače. Popis systému je zobrazen na Obr.2. Při uvolnění řídicího ventilu ze sedla, dochází k proudění paliva do zpětného vedení a zároveň průtoku paliva oběma restriktory. Díky rozdílným rozměrům vstupního a výstupního restriktoru, dochází v řídicí komoře k poklesu tlaku nad



Obr. 34. Princip otevírání trysky[13]

jehlou a dochází ke zdvihu jehly. Pro uzavření jehly, se řídicí ventil vrátí zpět do sedla a přes vstupní restriktor začne znovu proudit palivo do řídicí komory, čímž se zvýší tlak uvnitř komory a vzniklý tlak přitlačí jehlu zpět do sedla. [13]

Výhody piezoelektrických vstřikovačů:

- několikanásobný vstřik s možnými krátkými intervaly mezi jednotlivými vstřiky
- malá pilotní dávka
- malé rozměry a hmotnost
- nízká hlučnost
- nižší spotřeba paliva a emise motoru
- vyšší výkon

Nevýhody piezoelektrických vstřikovačů:

- Vyšší cena
- Kratší životnost ve srovnání se vstřikovači ovládanými elektromagneticky



Příloha 3: Protokol ze servisní stolice Hartridge CRi-PC

Resistance		Min	Max	Value	Units	
		0.30	0.40	0.00	Ohms	!
System Leak Check						
Start Motor. Check setup for leaks before continuing						
Pass						
Injector 1						
Injection Speed	Min	Max	Value	Units		
	0	0	1000	IPM		
Pulse Width	0	0	1000	µS		
Supply Temp	35.0	45.0	40.7	°C		Pass
Rail Pressure	975	1025	998	bar		Pass
Response Time	200	1000	327	µS		Pass
Response Variation	0	150	0	µS		Pass
Back Leak Flow	0.00	0.00	10.38	mm3/st		Pass
Back Leak Temp	0.0	0.0	39.0	°C		Pass
Back Leak Pressure	0	0	-4	mbar		Pass
Delivery	0.00	0.00	45.75	mm3/st		Pass
Delivery Variation	0.00	0.00	0.00	mm3/st		Pass
Purge						
Runs to ensure system operates and air is purged from metering unit. Make sure metering unit has drained once before s						
Pass						
Injector 1						
Injection Speed	Min	Max	Value	Units		
	0	0	500	IPM		
Pulse Width	0	0	2000	µS		
Supply Temp	35.0	45.0	40.6	°C		Pass
Rail Pressure	340	360	350	bar		Pass
Response Time	250	690	479	µS		Pass
Response Variation	0	250	21	µS		Pass
Back Leak Flow	1.00	50.00	20.64	mm3/st		Pass
Back Leak Temp	30.0	60.0	39.0	°C		Pass
Back Leak Pressure	0	0	-4	mbar		Pass
Delivery	0.00	0.00	44.70	mm3/st		Pass
Delivery Variation	0.00	0.00	1.51	mm3/st		Pass
Warm Up						
Pass						
Injector 1						
Injection Speed	Min	Max	Value	Units		
	0	0	2000	IPM		
Pulse Width	0	0	1000	µS		
Supply Temp	35.0	45.0	40.4	°C		Pass
Rail Pressure	1275	1325	1302	bar		Pass
Response Time	215	415	303	µS		Pass
Response Variation	0	100	0	µS		Pass
Back Leak Flow	1.00	50.00	19.02	mm3/st		Pass
Back Leak Temp	30.0	60.0	40.5	°C		Pass
Back Leak Pressure	0	0	-4	mbar		Pass
Delivery	0.00	0.00	55.68	mm3/st		Pass
Delivery Variation	0.00	0.00	0.98	mm3/st		Pass
Full Load						
Test with Full load parameters						
Pass						
Injector 1						
Injection Speed	Min	Max	Value	Units		
	0	0	1000	IPM		
Pulse Width	0	0	775	µS		
Supply Temp	35.0	45.0	40.1	°C		Pass
Rail Pressure	1325	1375	1343	bar		Pass
Response Time	245	395	306	µS		Pass
Response Variation	0	25	1	µS		Pass
Back Leak Flow	1.00	45.00	26.40	mm3/st		Pass
Back Leak Temp	30.0	65.0	44.3	°C		Pass
Back Leak Pressure	0	0	-4	mbar		Pass
Delivery	42.50	50.50	45.58	mm3/st		Pass
Delivery Variation	0.00	3.00	0.36	mm3/st		Pass
Mid Load						
Test with mid-load parameters						
Pass						
Injector 1						
Injection Speed	Min	Max	Value	Units		
	0	0	1000	IPM		
Pulse Width	0	0	500	µS		
Supply Temp	35.0	45.0	39.9	°C		Pass
Rail Pressure	790	810	801	bar		Pass
Response Time	255	405	342	µS		Pass
Response Variation	0	25	6	µS		Pass
Back Leak Flow	1.00	35.00	14.82	mm3/st		Pass
Back Leak Temp	30.0	65.0	45.0	°C		Pass
Back Leak Pressure	0	0	-4	mbar		Pass
Delivery	13.90	19.90	14.02	mm3/st		Pass
Delivery Variation	0.00	3.00	0.50	mm3/st		Pass
Low Load						
Test with Idle parameters						
Pass						
Injector 1						
Injection Speed	Min	Max	Value	Units		
	0	0	1000	IPM		
Pulse Width	0	0	725	µS		
Supply Temp	35.0	45.0	39.7	°C		Pass
Rail Pressure	245	255	250	bar		Pass
Response Time	300	999	860	µS		Pass
Response Variation	0	0	339	µS		Pass
Back Leak Flow	1.00	25.00	9.84	mm3/st		Pass
Back Leak Temp	30.0	65.0	44.8	°C		Pass
Back Leak Pressure	0	0	-4	mbar		Pass
Delivery	3.30	7.30	4.96	mm3/st		Pass
Delivery Variation	0.00	2.00	1.65	mm3/st		Pass
Pre Injection						
Test with Pre-injection parameters						
Fail						
Injector 1						
Injection Speed	Min	Max	Value	Units		
	0	0	1000	IPM		
Pulse Width	0	0	160	µS		
Supply Temp	35.0	45.0	39.9	°C		Pass
Rail Pressure	790	810	799	bar		Pass
Response Time	255	405	340	µS		Pass
Response Variation	0	25	7	µS		Pass
Back Leak Flow	1.00	35.00	10.62	mm3/st		Pass
Back Leak Temp	30.0	65.0	44.0	°C		Pass
Back Leak Pressure	0	0	-4	mbar		Pass
Delivery	0.30	2.70	3.05	mm3/st		Fail
Delivery Variation	0.00	1.50	0.10	mm3/st		Pass

Příloha 4: Ukázka databáze a programu na zpracování dat

Databáze vstřikovačů:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Aktualizace seznamu dat	Značka auta	Typ motoru	Rok výroby	Počet ujetých kilometrů	Závada/Projev vadných vstřikovačů	Výrobce	Seriové číslo vstřikovače	Výrobní číslo (Sn)	Měřicí cyklus	Další informace
1										
3	Zobrazit výsledky	Audi	3.3 V8 32v TDI CR 16 2001	250856	Zvýšená kouřivost, hrubý chod motoru	Bosch	445110066	1103	Porovnávací	Flexi + ocelové potrubí
4	Zobrazit výsledky	Audi	3.3 V8 32v TDI CR 16 2001	250856	Zvýšená kouřivost, hrubý chod motoru	Bosch	445110066	1103	42. bodů	Flexi + ocelové potrubí
5	Zobrazit výsledky	Audi	3.3 V8 32v TDI CR 16 2001	250856	Zvýšená kouřivost, hrubý chod motoru	Bosch	445110066	1105	Porovnávací	Flexi + ocelové potrubí
6	Zobrazit výsledky	Audi	3.3 V8 32v TDI CR 16 2001	250856	Zvýšená kouřivost, hrubý chod motoru	Bosch	445110066	1105	Porovnávací	Test proudů, krátké po
7	Zobrazit výsledky	Audi	3.3 V8 32v TDI CR 16 2001	250856	Zvýšená kouřivost, hrubý chod motoru	Bosch	445110066	1105	Porovnávací	Test proudů, krátké po
8	Zobrazit výsledky	Audi	3.3 V8 32v TDI CR 16 2001	250856	Zvýšená kouřivost, hrubý chod motoru	Bosch	445110066	1105	Porovnávací	Test proudů, krátké po
9	Zobrazit výsledky	Audi	3.3 V8 32v TDI CR 16 2001	250856	Zvýšená kouřivost, hrubý chod motoru	Bosch	445110066	1105	42. bodů	Krátké ocelové potrubí
10	Zobrazit výsledky	Audi	3.3 V8 32v TDI CR 16 2001	250856	Zvýšená kouřivost, hrubý chod motoru	Bosch	445110066	1207	42. bodů	Flexi + ocelové potrubí
11	Zobrazit výsledky	Mazda	1.6l 66kw	223 584	V nižších otáčkách dochází ke klepaní	Bosch	445110188	0986	Porovnávací	Krátké ocelové potrubí
12	Zobrazit výsledky	Mazda	1.6l 66kw	223 584	V nižších otáčkách dochází ke klepaní	Bosch	445110188	0986	42. bodů	Krátké ocelové potrubí
13	Zobrazit výsledky	Volkswagen	2.0 TDI	268539	Hrubý chod motoru, časté regenerace	Bosch	445110369	1111	Porovnávací	Měřeno s Flexi potrubí
14	Zobrazit výsledky	Volkswagen	2.0 TDI	268539	Hrubý chod motoru, časté regenerace	Bosch	445110369	1111	42. bodů	Měřeno s Flexi potrubí
15	Zobrazit výsledky	Volkswagen	2.0 TDI	268539	Hrubý chod motoru, časté regenerace	Bosch	445110369	2509	Porovnávací	Měřeno s Flexi potrubí
16	Zobrazit výsledky	Volkswagen	2.0 TDI	268539	Hrubý chod motoru, časté regenerace	Bosch	445110369	2509	42. bodů	Měřeno s Flexi potrubí
17	Zobrazit výsledky	Fiat Ducato 115	2.0 D, 85kw	302 247	x	Bosch	445110419	3614	Porovnávací	Flexi + ocelové potrubí
18	Zobrazit výsledky	Fiat Ducato 115	2.0 D, 85kw	302 247	x	Bosch	445110419	3614	Porovnávací	Flexi + ocelové potrubí
19	Zobrazit výsledky	Hyundai	1.2l	289156	Bez diagnostikované závady	Delphi	28332705	5172	42. bodů	Porovnání potrubí, Mě
20	Zobrazit výsledky	Hyundai	1.2l	289156	Bez diagnostikované závady	Delphi	28332705	5172	42. bodů	Porovnání potrubí, Mě
21	Zobrazit výsledky	Hyundai	1.2l	289156	Bez diagnostikované závady	Delphi	28332705	5172	42. bodů	Porovnání potrubí, Mě
51										
52										
53										
54										
55										
56										

Program na zpracování dat, karta Zpracovane_vysledky:

Rozbalovací nabídka pro výběr zkoumaného parametru, který se následně vykreslí do grafu

