

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VSTŘIKOVACÍ ZAŘÍZENÍ PRO PLYNNÁ PALIVA

POUŽITÁ PRO KOGENERAČNÍ JEDNOTKU

GASEOUS FUEL INJECTION SYSTEM FOR COGENERATION UNIT

Vedoucí práce: Ing. Doleček Vít, Ph.D.

2018

David Hor

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hor** Jméno: **David** Osobní číslo: **437713**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel**
Studijní program: **Teoretický základ strojího inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vstřikovací zařízení pro plynná paliva použitá pro kogenerační jednotku

Název bakalářské práce anglicky:

Gaseous fuel injection system for cogeneration unit

Pokyny pro vypracování:

Vytvořte rešerši vstřikovacích zařízení pro dodávku paliva do spalovacího motoru. Zaměřte se na kapalná i plynná paliva, včetně zkapalněných plynných paliv. Pro zadaný spalovací motor určete velikost vstřikovacích jednotek pro různé typy paliv. Na základě souhrnu parametrů vyberte nejvhodnější koncepci vstřikovacího zařízení.

Seznam doporučené literatury:

Macek Jan: Spalovací motory I.
Heywood John B.: Internal Combustion Engine Fundamentals
Databáze článků SAE: <https://saemobilus.sae.org/>

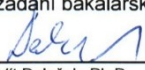
Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. Vít Doleček, Ph.D., ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel FS


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

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2018** Termín odevzdání bakalářské práce: **11.07.2018**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Vít Doleček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



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


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

26.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma Vstřikovací zařízení pro plynná paliva použitá pro kogenerační jednotku vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího práce. Všechny podklady použité při tvorbě jsou uvedeny v seznamu.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

David Hor

Poděkování

Rád bych tímto způsobem poděkoval všem lidem, kteří mě podpořili při tvorbě této práce. Chtěl bych poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vítu Dolečkovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady, příkladné vedení a přívětivý přístup. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Králíkovi, CSc. za možnost podílet se na tomto projektu, cenné rady a za přátelský a vstřícný přístup. Poděkování patří také mým nejbližším, kteří mě nejen ve studiu, ale i v životě podporovali a byli mi oporou.

Anotační list

Jméno a příjmení autora:	David Hor
Název katedry a fakulty:	12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, Fakulta strojní, ČVUT v Praze
Název bakalářské práce:	Vstříkovací zařízení pro plyná paliva použita pro kogenerační jednotku
Vedoucí bakalářské práce:	Ing. Doleček Vít, Ph.D.
Rozsah bakalářské práce:	79 stran, 24 obrázků, 5 tabulek, 1 příloha
Akademický rok:	2017/2018
Klíčová slova:	paliva, alternativní paliva, benzín, nafta, LPG, CNG, LNG, vodík, vstříkování paliva, systémy vstříkování paliva, tvorba směsi
Abstrakt:	Bakalářská práce se zabývá vstříkovacím zařízením spalovacích motorů pro kapalná i plyná paliva. V první části práce je zpracována rešerše paliv pro spalovací motory, přípravy směsi, regulace dávky paliva a systémů na přípravu směsi kapalných i plyných paliv. Dále se práce věnuje návrhu velikosti vstříkovacích jednotek pro zadaný motor při použití různých typů paliv. Ze zjištěných poznatků a parametrů je pro tento motor následně vybrána nejvhodnější koncepce vstříkovacího zařízení.

Summary

Name and surname of the author:	David Hor
Name of the department and the faculty:	12120 - Department of Automobiles, Combustion Engines and Rail Vehicles, Faculty of Mechanical Engineering, CTU in Prague
The title of the bachelor thesis:	Injection Device for Gaseous Fuels Used for the Cogeneration Unit
Head of bachelor thesis:	Ing. Doleček Vít, Ph.D.
Scope of the bachelor thesis:	79 pages, 24 pictures, 5 tables, 1 attachment
Academic year:	2017/2018
Keywords:	fuels, alternative fuels, gasoline, diesel, LPG, CNG, LNG, hydrogen, fuel injection, fuel injection systems, formation of the mixture
Abstract:	<p>The bachelor thesis deals with the combustion engines injection system for liquid and gaseous fuels. The first part of this thesis deals with fuel search for combustion engines, preparation of the mixture, fuel injection regulation and systems for preparation of liquid and gaseous fuel mixtures. Further, the thesis deals with the design of the injection unit sizes for the given engine using different types of fuels. Based on the findings and parameters in the theoretical part of the thesis subsequently the most suitable concept of the injection equipment is selected for this engine.</p>

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Paliva pro spalovací motory	10
2.1	Požadavky na motorová paliva	10
2.2	Palivo pro zážehové motory.....	11
2.3	Palivo pro vznětové motory	12
2.4	Konvenční paliva pro spalovací motory	13
2.5	Alternativní paliva pro spalovací motory.....	14
2.5.1	Ropný plyn LPG	15
2.5.2	Zemní plyn.....	18
2.5.2.1	Stlačený zemní plyn CNG	20
2.5.2.2	Zkapalněný zemní plyn LNG	22
2.5.3	Vodík	24
2.6	Porovnání paliv pro spalovací motory	27
3	Příprava směsi.....	29
3.1	Součinitel přebytku vzduchu.....	31
4	Výměna náplně válce a regulace dávky paliva	34
4.1	Regulace dávky paliva	35
5	Systémy na přípravu směsi konvenčních paliv	36
5.1	Karburátor	36
5.2	Nepřímé vstřikování paliva	37
5.2.1	Jednobodové vstřikování	38
5.2.2	Vícebodové vstřikování	39
5.3	Přímé vstřikování	42
6	Systémy na přípravu směsi LPG.....	46

6.1	Mechanicky řízený systém s podtlakovou regulací a centrálním směšovačem ...	46
6.2	Elektronicky řízený systém s podtlakovou regulací a centrálním směšovačem ..	46
6.3	Systém s elektronicky řízeným vícebodovým kontinuálním vstřikováním plynu	47
6.4	Systém s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním vstřikováním plynu .	47
6.5	Systém s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním vstřikováním kapalně fáze plynu	48
6.6	Systém přímého sekvenčního vstřikování kapalně fáze plynu řízeného elektronicky	49
7	Systémy na přípravu směsi zemního plynu	51
7.1	Systém na přípravu směsi stlačeného zemního plynu CNG	52
7.2	Systém na přípravu směsi zkapalněného zemního plynu LNG	54
8	Určení velikosti vstřikovacích jednotek pro různé typy paliv	55
8.1	Výpočet potřebných tlakových spádů	59
8.2	Názorný výpočet pro vstřikování kapalněho paliva, u kterého lze pro prvotní výpočty zanedbat vliv stlačitelnosti.	61
8.3	Názorný výpočet pro vstřikování (vefukování) plynněho paliva, u kterého nelze pro prvotní výpočty zanedbat vliv stlačitelnosti.	62
8.4	Tabulky s výsledky	65
9	Výběr nejvhodnější koncepce vstřikovacího zařízení pro zadaný motor	67
10	Závěr	69
	Seznam použitých informačních zdrojů	71
11	Seznam příloh	74
12	Seznam obrázků	75

13	Seznam tabulek.....	76
14	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	77

1 Úvod

Tato práce vznikla na podnět pana Ing. Petra Králíka, CSc., který přišel s požadavkem na vypracování řešerše vstřikovacích zařízení pro dodávku paliva do spalovacího motoru se zaměřením na kapalná i plynná paliva, včetně zkapalněných plynných paliv a ze zjištěných poznatků zvolení nejvhodnější koncepce vstřikování.

Spalovací motor jakožto tepelný stroj přeměňuje chemickou energii paliva na teplo a následně na mechanickou energii. Jelikož tento typ pohonu patří k nejpoužívanějším na naší planetě, je nezbytné každým dalším vývojem zvyšovat jeho účinnost společně se zvyšováním šetrnosti k životnímu prostředí. Proto je důležité optimalizovat spalovací procesy v motoru, které tyto faktory ovlivňují. K nim patří zejména použití vhodného paliva a jeho správné smísení se vzduchem.

Spalováním různých typů paliv vznikají rozdílná složení výfukových emisí a každé palivo klade různé nároky na správnou přípravu jeho směsi se vzduchem. Vlastnosti paliv jsou tedy důležité i pro pochopení toho, jak fungují různé systémy dodávky a přípravy směsi paliva se vzduchem do spalovacího motoru.

Prvním z cílů bakalářské práce je vypracování přehledu vlastností paliv pro spalovací motory, ze kterých plynou různé výhody a nevýhody při použití v odlišných provozech a podmínkách.

Dalším cílem je popsání rozličných způsobů přípravy směsi včetně dnes používaných systémů. Mezi ně patří nejen příprava směsi konvenčních kapalných paliv ale i příprava směsi plynných a zkapalněných paliv.

Výsledným cílem v této práci je určení velikosti vstřikovacích jednotek pro zadaný dvoudobý motor a různé typy paliv. Ze zjištěných poznatků a parametrů pro tento motor následně vybrat nejvhodnější koncepci vstřikovacího zařízení.

2 Paliva pro spalovací motory

Motorová paliva jsou tvořena směsí různorodých uhlovodíků. Velikost a stavba atomů, stejně jako poměr počtu atomů uhlíku a vodíku v molekulách a množství určitých druhů uhlovodíků obsažených v palivu, značně ovlivňují spalovací procesy v pístových spalovacích motorech. [4]

2.1 Požadavky na motorová paliva

Všechna motorová paliva jakožto nosiče energie musí vyhovovat základním požadavkům, mezi které patří zejména:

- vysoká výhřevnost na jednotku hmotnosti nebo objemu včetně obalu (nádrže, zásobníku);
- schopnost vytvářet v podmínkách válce (spalovacího prostoru) motoru kvalitní směs se vzduchem;
- schopnost spolehlivého zážehu (vznícení) směsi a co nejdokonalejšího vyhoření;
- vysoká čistota jako předpoklad bezproblémové dodávky paliva do motoru a co nejnižší agresivita vůči dílům palivového systému (nepůsobí korozi, netvoří úsady, laky atp.);
- stabilita vlastností při skladování a dopravě, dostatečně bezpečná manipulace;
- co nejnižší zdravotní závadnost a co nejnižší tvorba zdraví škodlivých produktů spalování (zejména sloučeniny síry, polycyklické uhlovodíky atd.);
- co nejnižší korozní účinky spalin (síra, vanad atd.);
- co nejnižší cena. [2, 3]

2.2 Palivo pro zážehové motory

Jak už vyplývá z názvu, u tohoto typu motoru je palivo ve válci zažehnuto jiskrou ze zapalovací svíčky. Zažehnutí připravené směsi je velice důležitou součástí celého děje. Musí být provedeno s dostatečnou energií, aby se zapálená směs co nejúplněji spálila. Zážehové motory nejčastěji pracují s kompresním poměrem do 10:1. Při vyšším kompresním poměru může totiž vlivem vyšších teplot při kompresi docházet k samovolnému (neřízenému) rozběhu oxidačních reakcí v podmínkách pracovního oběhu ve válci motoru neboli k detonačnímu spalování. To se projevuje tzv. „klepáním motoru“. Výrobci moderních zážehových motorů se ovšem snaží o zvyšování kompresního poměru, za účelem zvýšení účinnosti spalování a snížení spotřeby paliva. Lídrem v tomto oboru je společnost Mazda, která se svým novým motorem SkyActiv-X dosahuje variabilního kompresního poměru od 14,7:1 až po více než 29,4:1. K zapálení směsi přitom používá kompresní zapalování řízené zapalovací svíčkou, tzv. označení SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition). Kombinuje tedy principy vznětových a zážehových motorů. [1, 3, 5]

Základním požadavkem na paliva pro zážehové motory je schopnost snadno tvořit zápalnou směs se vzduchem, tzv. karburační schopnost a odparnost paliva. Jedna z nejdůležitějších vlastností je odolnost proti detonačnímu spalování. Tuto vlastnost udává tzv. oktanové číslo. Dále schopnost snadného zapálení (zažehnutí) směsi pomocí řízeného zdroje zážehu (vysokonapěťového výboje na zapalovací svícce). [3]

2.3 Palivo pro vznětové motory

Postup přípravy směsi a jejího spalení probíhá u vznětových motorů zcela odlišně oproti zážehovým motorům. Směs se u vznětových motorů připravuje přímo ve válci, kde je do nasátého a případně i předehřátého vzduchu, který byl stlačen během kompresního zdvihu na nejmenší kompresní objem, vstříknuto palivo. U starších vznětových motorů se musely používat žhavící svíčky, kvůli předehřátí motorového prostoru před nastartováním. Motorová nafta, jakožto nejpoužívanější palivo pro vznětové motory, by se měla smísit se vzduchem ohřátým na vysokou teplotu díky kompresi až v okamžiku jeho vznícení. Také se ve válci nesmí vytvořit homogenní směs, která bývá žádoucí u zážehových motorů, protože by se vlivem jejího okamžitého vzplanutí v celém obsahu válce vytvořily nepřipustně vysoké tlaky. Pro dosažení potřebné teploty vznícení je nutno použít velký kompresní poměr a to až 20:1. Pro dosažení dobré přípravy směsi musí být palivo přiváděno do motoru přes vstřikovací trysky s vysokým tlakem. V dnešních vznětových motorech, používajících systém common-rail, se pracuje s tlaky až přes 200 MPa. Takto vysoký tlak se používá z důvodu lepšího rozprášení paliva na menší částice, což zajišťuje dokonalejší spalování. Elektronicky řízené vstřikovače pracují s konstantním tlakem, který je jim dodávaný z tlakového zásobníku, a jsou schopny za jeden cyklus vstříknout až 7 přesných dávek paliva, to vše z důvodu postupného nárůstu tlaku ve válci. [1, 6]

Základním požadavkem na paliva pro vznětové motory je schopnost samovolného rozběhu oxidačního procesu (vznícení) v podmínkách spalovacího prostoru neboli reaktivita nafty. Tuto vlastnost udává tzv. cetanové číslo. Významným parametrem je dále také hustota paliva, která se mění s teplotou a je proto potřeba dynamicky upravovat dávku paliva tak, aby nedošlo ke zhoršení emisí. Pro zajištění rychlého rozpadu paprsku vstříkovaného paliva na jednotlivé kapky (palivovou mlhu) je významná i viskozita a povrchové napětí paliva. Viskozita paliva také ovlivňuje mazací vlastnosti paliva a na nich závisí životnost palivového čerpadla. Důležitým požadavkem na motorovou naftu je vysoká čistota a zejména nízký obsah sloučenin síry, která se podílí na výskytu studené a horké koroze. Dále mezi požadavky patří nízké karbonizační číslo, které charakterizuje sklon paliva k tvorbě karbonových úsad ve spalovacím motoru. [3, 4]

2.4 Konvenční paliva pro spalovací motory

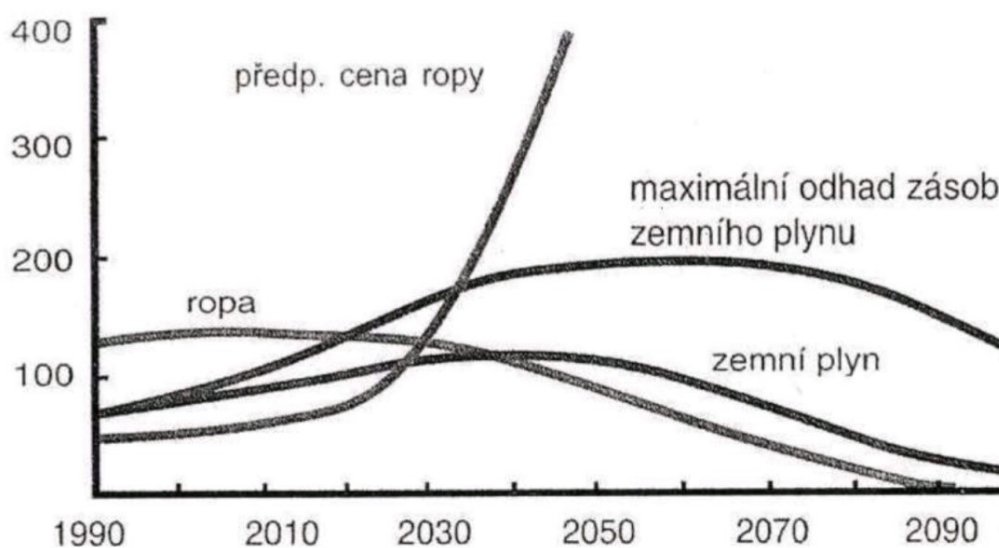
Nejpoužívanějšími konvenčními palivy v pístových spalovacích motorech jsou kapalná paliva tvořená směsí uhlovodíků, jako je benzín a motorová nafta. Tato paliva se získávají frakční destilací ropy v rafinériích. Při zahřívání ropy v destilačních věžích bez přístupu kyslíku se základní směs rozdělí na skupiny (frakce) s určitým rozmezím bodu varu, vhodným pro zamýšlené použití. Zahříváním se jednotlivé frakce odpařují a následně jsou zkapalňovány pomocí kondenzace. Destilační rozmezí odděluje jednotlivé skupiny uhlovodíků do 3 skupin motorových paliv. [3, 4]:

1. Bod varu asi do 180 °C - tzv. lehká motorová paliva (převážně benzín).
Obsahují většinou parafíny (přímý řetězec) a cykloparafíny (kruhový řetězec).
2. Bod varu asi od 180 °C do asi 280 °C - tzv. středně těžká motorová paliva (petrolej, kerosin). Ta jsou určena především pro pohon spalovacích turbín a proudových motorů.
3. Bod varu asi od 210 °C do asi 360 °C - tzv. těžká motorová paliva. (především motorová nafta). [4]

Potřebné složení uhlovodíků ve všech skupinách se dále upravuje vhodnými technologiemi (krakování, reformace, polymerace, alkylace apod.) Mezi nejpoužívanější motorová paliva patří právě 1. a 3. frakce ropy, tedy benzín a motorová nafta. [4]

2.5 Alternativní paliva pro spalovací motory

Konvenční paliva nejsou vhodná z hlediska problémů se znečištěním životního prostředí a docházejícím zásobám ropy. Se zmenšujícími se zásobami ropy se každým rokem její cena zvyšuje přibližně o 5 %. Kvůli těmto faktorům lidé už před více jak třiceti lety začali hledat alternativní zdroje energie. Šlo jim o nalezení energie, která bude méně škodit životnímu prostředí a zároveň zaručí dopravu i v budoucnu. Již dnes už víme, že spalování ropy jakožto fosilního paliva někdy skončí a poté bude chybět chemickému průmyslu, který je na ní závislý (viz obr. 1). V příštích dvaceti letech mají šanci nahradit z více než 5 % spotřebu motorových paliv pouze 3 alternativní paliva. Jsou to v současnosti již používaná biopaliva, ve střednědobém horizontu zemní plyn a v dlouhodobém horizontu vodík. Trend dnešní doby je přidávání stále většího podílu biopaliv do nafty a benzínu. [4, 7]



Obr. 1- Odhad maximálních světových zásob ropy a zemního plynu. [7]

2.5.1 Ropný plyn LPG

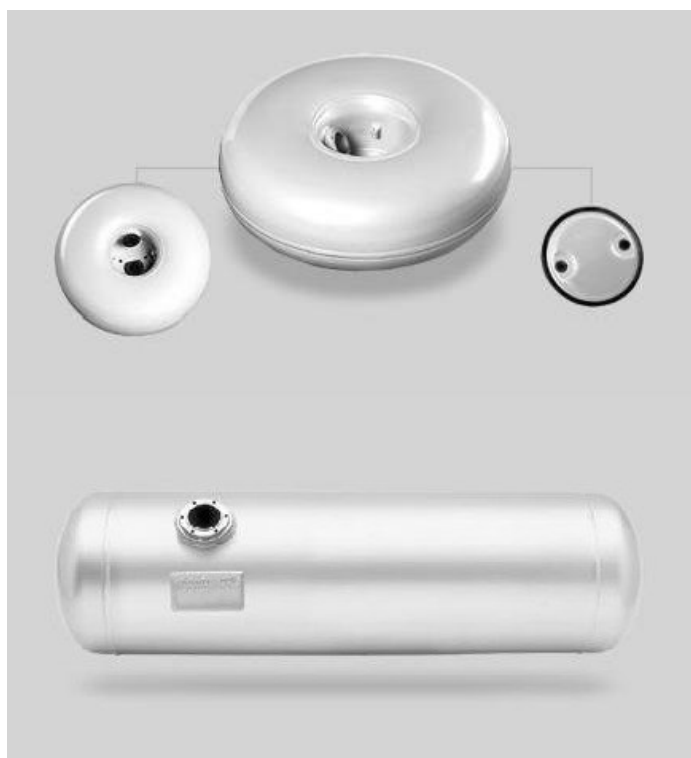
Zkapalněný ropný plyn (LPG – Liquefied Petroleum Gas) vzniká jako vedlejší produkt zpracování ropy a v dnešní době je to nejpoužívanější plynné alternativní palivo. Zkapalněný ropný plyn je směsí propanu a butanu, jejichž poměr se může měnit v závislosti na ročních obdobích či na umístění plnicích stanic. Poměr propanu a butanu je v různých zemích odlišný, např. v České republice je podíl propanu 40 % až 60 % objemu plynu. Dále může obsahovat i malé množství jiných forem uhlovodíků. Výhřevnost vztažená na jednotku hmotnosti je u LPG o trochu vyšší v porovnání s konvenčními palivy. Zároveň má tento plyn výborné antidetonační vlastnosti. Oktanové číslo LPG je přibližně 95–105 (OČ benzínu je od 95-100). Díky tomu může být použit vyšší kompresní poměr, což vede k dosažení vyšší tepelné účinnosti motoru. Toto palivo obsahuje jen velmi málo síry, žádné benzenové uhlovodíky a žádné olovo. Umožňuje dosáhnout velmi homogenní směsi paliva se vzduchem, která je vhodná pro spalování v zážehových motorech. Vozy na plynový pohon bývají stejně tak jako vozy na benzínový pohon vybaveny třícestným katalyzátorem. Zcela tak vyhovují normám na snížení znečištění a normové požadavky dokonce značně překračují.

Z technického hlediska je používání LPG v motorových vozidlech otevřené a bezproblémové. U tohoto typu pohonu je možná dodatečná montáž do sériového zážehového motoru. U sériových vznětových motorů je nutná rekonstrukce na plynový zážehový motor, nebo přestavba motoru na obojí palivo, kdy se LPG zapaluje pomocí vznícení nafty. Výfukové plyny motorů spalujících LPG obsahují méně škodlivin. Při srovnání se vznětovými či zážehovými motory spalujícími kapalná paliva produkuje motor na čistý propan spaliny s tak malým procentem škodlivých emisí, že může být zařazen mezi motory s velmi nízkou produkcí emisí tzv. ULEV (Ultra Low Emission Vehicles). Výkon je o přibližně 5 % nižší a spotřeba přibližně o 10 až 20 % vyšší v porovnání se zážehovými motory na benzín. S přihlédnutím na cenu je toto palivo i přes vyšší spotřebu ekonomicky výhodnější v porovnání s konvenčními palivy.

Při teplotách a tlakových podmínkách běžného klimatu je tato směs plynná. Při vyvinutí poměrně malého tlaku lze však směs zkapalnit i za normální teploty. Je-li teplota 20 °C, zkapalní se propan při tlaku 0,85 MPa a butan při 0,23 MPa. Po zkapalnění má směs přibližně 250krát menší objem než v plynném stavu. Tato vlastnost umožňuje tomuto palivu možnost skladovat v poměrně malém prostoru velké množství energie.

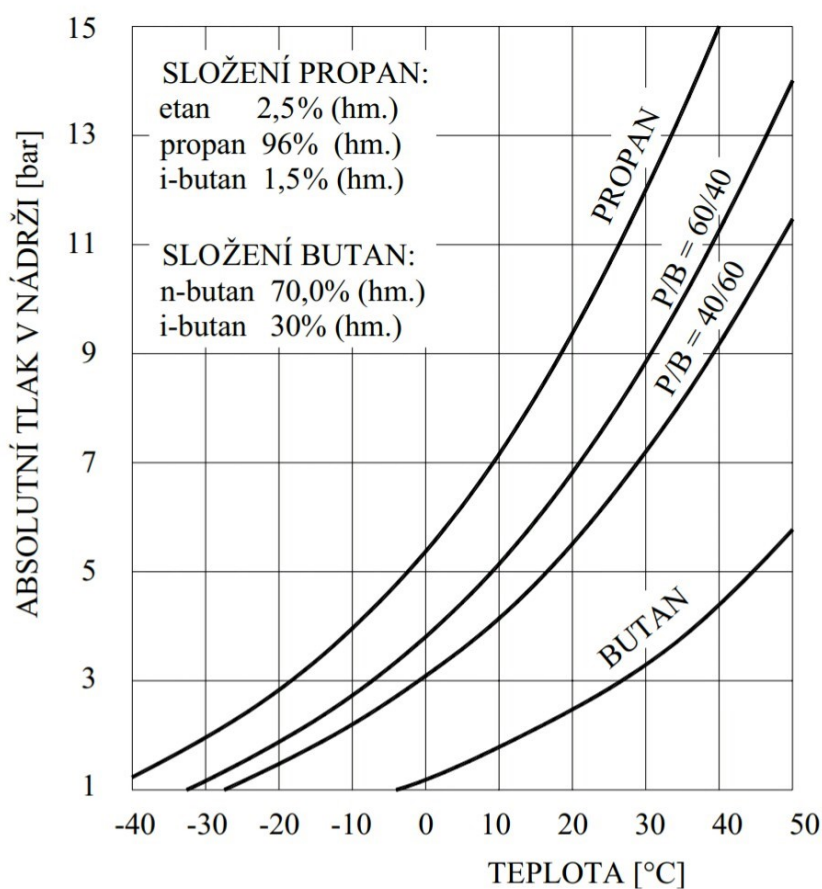
Nejkvalitnější složka, která má podstatný podíl v LPG je propan C_3H_8 . Jeho vlastnosti jsou velmi prospěšné pro použití v motorových vozidlech mimo jiné i z hlediska potřebného tlaku paliva v nádrži, díky kterému je možné palivo dopravovat z nádrže do palivového systému motoru.

Nádrže na LPG musí být pevně zabudovány ve vozidle. Bývají válcovitého či toroidního tvaru, který je vhodný zejména do prostoru místo rezervního kola. Jsou zkoušeny na přetlak 3 MPa, přičemž nejvyšší provozní přetlak je 2,5 MPa. Obvyklá velikost nádrží je 45–60 l, avšak plní se pouze do 80 %.



Obr. 2 - Ukázky nádrží na LPG (toroidní - nahoře, válcová - dole). [12]

Dalším parametrem, který je značně ovlivněn složením, je tlak par. Pro bezproblémové použití LPG zejména v zimních měsících je důležité, aby v plynové soustavě vozidla byl dostatečný přetlak pro zajištění kontinuální dodávky paliva z nádrže do regulačního a dávkovacího členu v motorovém prostoru. Jedná se o nezbytný předpoklad funkce jednodušších systémů zástavby LPG ve vozidlech, která nejsou vybavena elektrickým palivovým čerpadlem. Tlak v nádrži je určen tlakem nasycených par LPG a závisí pouze na složení a teplotě LPG, úroveň naplnění nádrže nemá na tlak žádný vliv. Zatímco propan má bod varu $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, což zaručuje, že i při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ jeho tlak dosahuje $0,25\text{ MPa}$ ($2,5\text{ bar}$), tak butan s bodem varu zhruba $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ vykazuje tlak při teplotách pod bodem mrazu menší než atmosférický (viz obr. 3). Pro zajištění dostatečného tlaku LPG v nádrži i v zimním období se proto může složení LPG měnit podle ročního období.



Obr. 3 - Závislost tlaku v nádrži na složení a teplotě LPG. [9]

Ačkoliv je LPG palivo s pozoruhodnými vlastnostmi, nejen z hlediska životního prostředí, stále však nepředstavuje dlouhodobé řešení problému automobilového průmyslu zejména kvůli závislosti na ropě. Spalováním LPG totiž vznikají stejné hlavní znečišťující látky jako u nafty a benzínu, avšak je jich daleko méně. [4, 7, 9]

2.5.2 Zemní plyn

Zemní plyn se skládá přibližně z 85 % metanu z 10 % dusíku a oxidu uhličitého a z 5 % vyšších uhlovodíků. Toto složení ale bývá proměnné a liší se dle zemí a dodavatelů. V České republice obsahuje zemní plyn více jak 90 % obj. metanu a méně než 5 % nehořlavých látek. Metan (CH_4) je jednoduchý uhlovodík bez barvy a zápachu, je hořlavý a se vzduchem vybuchující plyn. Je nejedovatý, má zanedbatelné toxické účinky a je lehčí než vzduch. Vyskytuje se často v přírodě, i jako důlní či bahenní plyn. Celkové odhadované světové zásoby zemního plynu mají životnost až 200 let. Metan pod názvem bioplyn lze taktéž získávat při anaerobní fermentaci organických látek živočišného, nebo rostlinného původu. Nejen díky těmto důvodům je zemní plyn považován za perspektivní palivo budoucnosti.

Mezi důvody, proč je dobré používat zemní plyn, jako palivo pro spalovací motory, patří zejména ekologické výhody. Motory spalující zemní plyn produkují výrazně méně škodlivin než vozidla spalující konvenční paliva. To vyplývá především z chemického složení zemního plynu. Metan, jakožto hlavní složka zemního plynu, je nejjednodušší uhlovodík. Molekula metanu obsahuje čtyři atomy vodíku a jeden atom uhlíku. Oproti ostatním uhlovodíkům dochází při spalování k oxidaci menšího množství uhlíku, tudíž ke vzniku menšího množství oxidů dusíku, oxidu uhelnatého a uhlíčitého. Kromě dnes sledovaných oxidů dusíku produkují také méně pevných částic, ale i polyaromatických uhlovodíků, aldehydů a aromátů včetně benzenu. Za předpokladu použití katalyzátoru má vůz s motorem na zemní plyn šanci plnit kalifornský emisní standard pro automobily s mimořádně nízkými emisemi ULEF (Ultra-Low-Emission-Vehicles). Zemní plyn má vynikající odolnost proti detonačnímu spalování (oktanové číslo přibližně 130). Díky této vlastnosti může být motor spalující zemní plyn konstruován na vyšší kompresní poměr (až 13:1) a u přeplňovaných motorů i na vyšší plnicí tlak oproti motorům spalující benzín. V porovnání s motory spalující benzín či naftu je u plynových motorů rovněž menší vliv na skleníkový efekt. Náklady na zemní plyn jako pohonnou hmotu jsou přibližně 2x až 3x nižší, tudíž spalovat zemní plyn je i ekonomicky výhodné.

K provozním výhodám patří lepší směšování zemního plynu se vzduchem, které umožňuje vytvořit homogenní směs a možnost pracovat s vysokým součinitelem přebytku vzduchu. Při spalování zemního plynu se vnitřní části motoru nezanáší karbonovými úsadami. Z toho plyne vyšší životnost motoru a oleje. Bezpečnost používání zemního plynu podtrhuje i fakt, že oproti benzínu, naftě, LPG, a dokonce i vzduchu je lehčí. Zápalná teplota oproti benzínu je dvojnásobná, což sice zvyšuje bezpečnost, ale klade větší nároky na technologii zapalování. Tlakové nádrže, které se vyrábí z oceli, hliníku či kompozitu jsou bezpečnější než benzínové nádrže. Zemní plyn má také výhodu v dostupnosti, protože je přepravován již vybudovanými plynovody. I přesto ale jako každé alternativní palivo trpí zemní plyn nedostatečnou infrastrukturou plnicích stanic v ČR.

Při spalování plynného paliva vznikají vyšší teploty v motoru, proto některé součásti v něm musí být vyrobeny z ušlechtlejších materiálů, a to zvyšuje cenu oproti běžným motorům. Pro plynová vozidla platí při garážování a opravách zpřísněná bezpečnostní opatření. [4, 7, 9]

2.5.2.1 Stlačený zemní plyn CNG

CNG (Compressed Natural Gas) je zemní plyn stlačený až na tlak 20 MPa. Tím se docílí až 200x menšího objemu. Stlačený plyn se plní do tlakové nádrže, která má zpravidla objem 70–100 l. Těchto nádob může být ve vozidle i více a dají se vzájemně propojit. Tlakové nádrže jsou většinou ocelové, ale kvůli jejich vyšší hmotnosti je začínají nahrazovat odlehčené nádrže z lehkých hliníkových nebo kompozitních materiálů, které jsou stejně pevné jako ocel, dražší, ale váží až 3x méně. Jsou konstruovány na tlak až 40 MPa. Nádrž je osazena armaturami pro bezpečný a spolehlivý provoz včetně multiventilu. Ten plní provozní a bezpečnostní funkce. Řídí odebírání plynu z nádoby, uzavírá tlakovou nádobu při vypnutém systému, vypustí plyn při daném přetlaku (26 MPa), tepelná pojistka odpustí zemní plyn v případě požáru, jakmile dojde k poškození potrubí rozpozná únik tlaku a přeruší průtok plynu. Někteří výrobci udávají životnost tlakových lahví až 20 let, což je více jak životnost automobilu. Nevýhodou však je, že aby vozidla na CNG měla konkurenceschopný dojezd, musí být vybavena tlakovými nádržemi, které mohou být až 20x těžší než nádrže pro konvenční paliva. [4, 7, 9, 13]

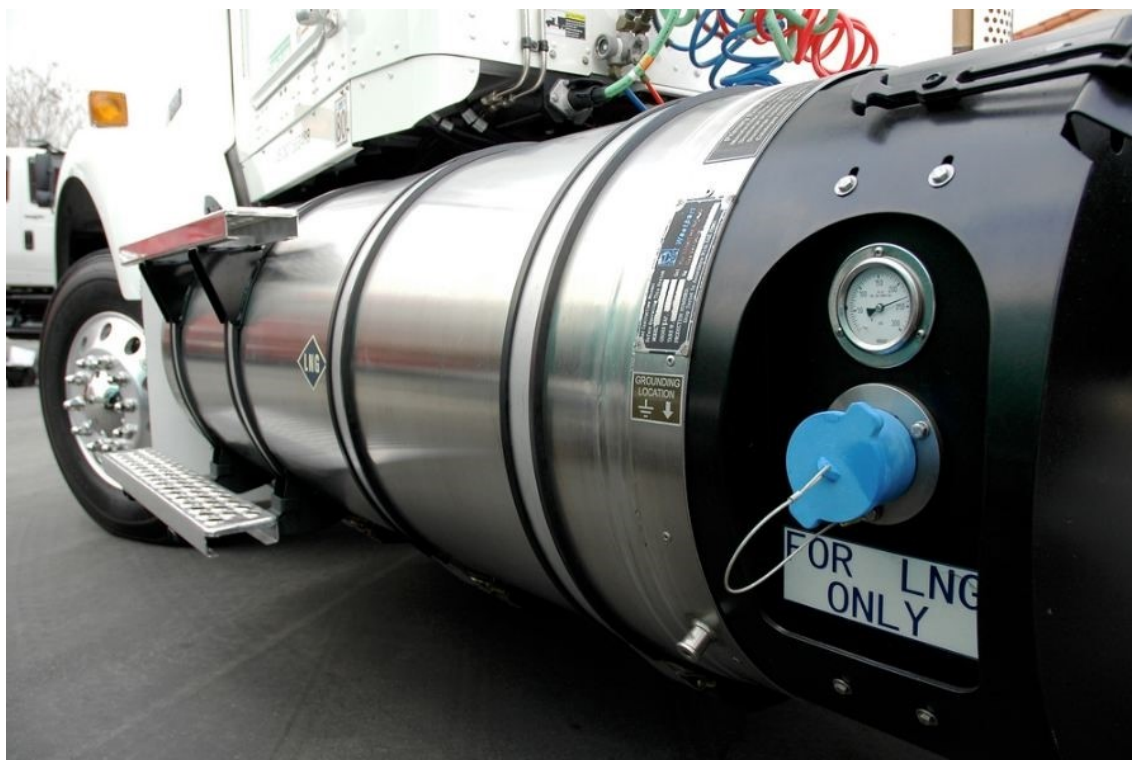


Obr. 4 - Pohled na zadní část vozu Škoda Octavia G-Tec a na jeho dvě ocelové tlakové nádrže, které dohromady pojmu až 15 kg CNG. [13]

Pro plnění tlakových nádob automobilů jsou používány dva typy stanic. První typ je stanice pro rychlé plnění, kde se plyn odebírá z plynovodní sítě a stlačuje se až na tlak 20–30 MPa do vzájemně propojených tlakových zásobníků. Plnicí konektor hadice výdejního stojanu se připojí pomocí rychloupínacího systému na plnicí ventil vozidla. Vlastní plnění trvá asi 3–5 minut a je realizováno pomocí přepouštění stlačeného zemního plynu z tlakových zásobníků prostřednictvím výdejního stojanu do tlakové nádoby (nádob) ve vozidle. Druhý typ je stanice pro pomalé plnění, kde se plnění provádí přímo z plynovodní sítě do tlakových lahví ve vozidle pomocí malého kompresoru bez tlakových zásobníků. Tento typ plnění trvá 5-8 hodin a je vhodný pro plnění přes noc. Například pro rodinné domky, či menší firmy. Infrastruktura plnicích stanic v ČR není zatím nikterak velká, ale plnicí stanice přibývají a v budoucnu budou nadále přibývat. [4, 7, 9]

2.5.2.2 Zkapalněný zemní plyn LNG

LNG (Liquefied Natural Gas) je zkapalněný zemní plyn, při $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tlaku $0,1\text{ MPa}$. Po zkapalnění tvoří zemní plyn namodralou, průzračnou kapalinu s minimální viskozitou. Zkapalněním zemního plynu na LNG se docílí cca 600x menšího objemu. Oproti CNG zaujímá LNG přibližně 3x menší objem a z toho vyplývá téměř 3x větší dojezd v porovnání s vozidlem se stejně velkou nádrží na CNG. Zkapalněný plyn se ve vozidlech uchovává ve dvouplášťových nádobách z nerezové oceli o minimální tloušťce 3 mm na vnitřním i vnějším plášti. Mezi těmito plášti se nachází tzv. superizolace, což je navinutá hliníková fólie prokládaná sklo-vláknitým papírem, a je zde odčerpán vzduch až na vysoké vakuuum. Nádrže jsou konstruovány na tlak $1,6\text{ MPa}$, přičemž skutečný provozní tlak se řídí potřebou vstřikovacího systému motoru a pohybuje se od $0,3$ do 1 MPa . Nádrž je vybavena armaturami pro plnění, regulaci tlaku, odběr paliva do výměníku tepla, měřením hladiny a tlaku. Nádrž může být na vozidle i více.



Obr. 5 - Kryogenní nádrž na LNG umístěná na tahači používaného v USA. [14]

V kapalném stavu má zemní plyn vyšší hustotu energie oproti stlačenému zemnímu plynu (CNG), to v konečném důsledku znamená zvýšení dojezdu vozidla na srovnatelnou úroveň s vozidlem na konvenční pohonné hmoty, což vozidla na CNG nabídnout nemůžou. Pro názorné srovnání 1,5 litru LNG energeticky odpovídá 1 litru benzínu a 1,7 litru LNG odpovídá 1 litru nafty. Při použití technologie LNG lze použít menší a lehčí nádrž pro uskladnění stejného množství plynu. Hmotnost tlakových nádrží CNG je ve srovnání s LNG nádržemi zhruba 5x vyšší v případě ocelových nádob a zhruba 2x vyšší, pokud se jedná o nádrže z lehkých kompozitních materiálů, které jsou dražší i přesto, že LNG nádrže musí být velmi důkladně izolovány.

I přes obrovskou energetickou a technologickou náročnost se zemní plyn zkapalňuje kvůli své vyšší objemové hustotě energie, která se s oblibou využívá při přepravě námořními tankery, silničními cisternami, či samotnými vozidly. Při zkapalnění se zemní plyn zbavuje různých příměsí a zušlechťuje se až na téměř 100% metan.

LNG stanice jsou jednoduché konstrukce a skládají se z LNG zásobníku, odstředivého ponorného čerpadla, odpařovače, řídicího a bezpečnostního systému a výdejního stojanu s průtokoměrem. LNG je na stanici dopravován silničními cisternami, z čehož vyplývá výhoda, že LNG stanice mohou být postaveny téměř kdekoli. Další výhodou je kratší doba plnění oproti CNG a menší počet stanic potřebný pro vytvoření dostatečné infrastruktury díky většímu dojezdu vozidel na LNG. Z nízkoteplotních technologií LNG vyplývají nevýhody v podobě čerpání, skladování a plnění vozidel. V České Republice je infrastruktura téměř nulová, zatímco v USA, Kanadě, Španělsku, Polsku či Německu se už doprava pomocí LNG využívá. [4, 7, 9]

2.5.3 Vodík

Vodík je nejjednodušší, nejlehčí a nejrozšířenější prvek ve vesmíru. Za normální teploty a tlaku je to stabilní, bezbarvý, lehký plyn bez chuti a zápachu. Je hořlavý, ale hoření nepodporuje. Jeho plamen má namodralou barvu. Vede teplo 7x lépe než vzduch a je přibližně 14x lehčí. Pouze 1 % z celkového množství vodíku vyskytujícího se na zemi představuje plynný vodík.

Je významně zastoupen ve fosilních palivech, ale prakticky nevyčerpatelné zásoby jsou ve vodě. Vodík je možné průmyslově vyrábět elektrolýzou vody, ale lze ho také získávat ze zemního plynu nebo uhlí. Za perspektivní surovinu pro výrobu vodíku je považována biomasa.

Ze všech chemických látek má vodík největší obsah energie na jednotku hmotnosti. Spalné teplo vodíku (141,86 MJ/kg) je 2,5x větší než spalné teplo metanu (55,55 MJ/kg). Vzhledem k relativně menšímu obsahu vodíku v metanu je výhřevnost vodíku (120,05 MJ/kg) jen 2,4x větší než výhřevnost metanu (50,07 MJ/kg). Vodík tvoří výbušnou směs se vzduchem nebo kyslíkem, a to v širokém koncentračním rozmezí (4–77 % obj. vodíku ve vzduchu, 4–95 % obj. vodíku v kyslíku). Na vzduchu je velmi lehce zápalný. K iniciaci výbuchu vodíkové směsi stačí jen 0,02 MJ, zatímco k iniciaci výbuchu benzínové a metanové směsi je zapotřebí energie o velikosti 0,24 MJ, resp. 0,29 MJ. K iniciaci výbuchu směsi vodíku s fluorem a chlorem stačí pouhá iniciace světlem. Energie exploze vodíkové směsi je ve srovnání s energií exploze metanové směsi více než dvojnásobná. Vyjádřeno ekvivalentem TNT je to 24 g TNT/g u vodíkové směsi a 11 g TNT/g u metanové směsi. Vodíkové směsi mají mnohem širší detonační limity, než směsi benzínových par se vzduchem a směsi metanu se vzduchem.

Energii obsaženou ve vodíku lze uvolnit dvěma způsoby, buď přímo ve spalovacím motoru, nebo ve "studené" formě v palivovém článku přímou přeměnou v elektrický proud, což je zároveň způsob dosahující vyšší účinnosti (až 80 %). To je důvod, proč je považováno za perspektivní využití vodíku především v palivových článcích.

Palivové články jsou elektrochemická zařízení, která kontinuálně konvertují chemickou energii přiváděného plynného vodíku a kyslíku přímo na energii elektrickou. V těchto zařízeních není vodík termicky spalován, nýbrž elektrochemicky oxidován při současném získávání elektrické energie. Výsledným produktem oxidace je pouze voda.

Vodík je možné spalovat i ve speciálně konstruovaných pístových nebo proudových spalovacích motorech. Principiálně pracují tyto motory stejně jako ty na dosud používaná paliva. Spalování probíhá s přebytkem vzduchu, protože rychlost plamene vodíku je značná i u velmi chudých směsí. Nízká teplota spalování současně brání vzniku oxidů dusíku (NO_x), které se u zážehových motorů neutralizují pomocí redukčního katalyzátoru. Vodíkové motory pracují prakticky bez emisí, a to bez dalších přídavných zařízení. Oproti benzínovým motorům jsou všechny komponenty pro regulaci emisí sníženy až o 99,9 %.

Hmotnostní výhřevnost vodíku je téměř trojnásobná oproti benzínu. Díky těmto svým vlastnostem se vodík jeví jako vynikající palivo budoucnosti. Masovému rozšíření však brání řada problémů. Ty spočívají především v tankování a skladování vodíku. Při dodržení bezpečnostních norem by musely být nádrže příliš těžké. Utěsnění přívodních potrubí, kdy malá molekula vodíku proniká ven už při tlaku 22 MPa i při použití speciálních dotěšňovacích kroužků, je další nemalý problém. Prozatím jedinou nadějí je absorpce vodíku ve formě hydridu železa nebo titanu. Vodík může být poté uvolňován zahříváním např. výfukovými plyny.

K základním bezpečnostním pravidlům při manipulaci s vodíkem patří zabránění vzniku směsi vodíku a vzduchu. V těchto podmínkách stačí už jen pouhý rozžhavený předmět k iniciaci výbuchu této směsi. Při manipulaci s vodíkem je nutné dodržovat příslušné bezpečností, technické a protipožární předpisy. Celá dopravní trasa vodíku od láhve či zásobníku až ke spotřebiči musí být těsná tak, aby nemohlo dojít ke vzniku výbušné směsi. V případě netěsnosti musí být odběr vodíku z láhve přerušen. Při opětovném naplnění potrubí je nutné propláchnout potrubí čistým vodíkem, nebo dusíkem. Na rozdíl od ostatních plynů má vodík při obvyklých teplotách záporný Joule-Thomsonův koeficient, a proto se zahřívá při uvolnění tlaku. Může tedy dojít k jeho samovolnému vznícení při náhlé expanzi ze stlačeného stavu. Proto je při manipulaci se stlačeným vodíkem nutné pracovat s největší opatrností.

U tlakových lahví se stlačeným plynem se tlak v láhvi zvyšuje s rostoucí teplotou. Podmínky při skladování a používání lahví s vodíkem by měly zaručit, aby teplota plynu v láhvi nepřekročila 50 °C. Jelikož je molekula vodíku tak malá, že při tlaku v nádobě 22 MPa proniká ven i při použití speciálních dotěšňovacích kroužků, musí se předcházet zvyšování tlaku (tudíž i teploty) vodíku v tlakových nádrží. Vzniká tedy nebezpečí výbuchu při parkování v krytých prostorách jako jsou garáže, kvůli zvyšování koncentrace vodíku u stropů vlivem menší hmotnosti vodíku v porovnání se vzduchem. U takových krytých prostor, kde se nachází vodíkové láhve, musí být zajištěno stálé větrání. [4, 7, 9]

2.6 Porovnání paliv pro spalovací motory

V tabulce 1 můžeme vidět srovnání vybraných fyzikálně-chemických vlastností paliv pro spalovací motory. Pokud se zaměříme na výhřevnost paliva, což je jeden z nejdůležitějších parametrů paliv pro spalovací motory, zjistíme, že největší výhřevnost vztahenou na jednotku hmotnosti má kapalný vodík. Bohužel je však vzhledem k jeho nízké měrné hmotnosti jeho objemová výhřevnost ze všech kapalných či zkapalněných paliv nejhorší. Nejvyšší objemovou výhřevnost má motorová nafta, po které následují benzín a zkapalněná paliva (LPG, LNG).

Za nejekologičtější palivo lze považovat vodík, při jehož spalování vzniká až o 99,9 % méně škodlivých emisí ve srovnání se spalováním benzínu, ale vzhledem k jeho špatné skladovatelnosti a téměř neexistující infrastruktuře je jeho hromadné nasazení v dnešní době nerealizovatelné.

Při použití zemního plynu klesají produkce oxidu uhličitého až o 20 %, přičemž náklady na toto palivo jsou dvakrát až třikrát nižší v porovnání s benzinem. Použitím zkapalněného zemního plynu dosáhneme poměrně velké dojezdové vzdálenosti na rozdíl od stlačeného zemního plynu, se kterým je možno ujet jen 200 až 300 km na jednu nádrž. Výroba zkapalněného zemního plynu je však poměrně složitá a energeticky náročná. Zemní plyn je bohužel fosilní palivo stejně tak jako LPG. Spalováním těchto dvou paliv se ovšem vytváří nižší emise než spalováním benzínu. LPG je velmi rozšířené díky poměrně husté síti čerpacích stanic, možnosti přepínání mezi plynem a benzinem, a také díky nízké ceně. Ta je přibližně o polovinu nižší než cena benzínu.

Jistý potenciál lze vidět také ve využití odpařování kapalného paliva ve spalovacím prostoru či sání, což vede k ochlazení, k možnosti zvýšení kompresního poměru a k následnému zvýšení účinnosti. Nejvyšší hodnotu výparného tepla má zkapalněný zemní plyn.

Vlastnosti	Jednotka	Benzín	Nafta	LPG (P/B = 60/40)	Zemní plyn	Vodík
Oktanové číslo	-	88–100	-	105	130	130
Cetanové číslo	-	-	40–55	-	-	
Teplota vznícení	°C	450	300	430	537–580	585
Teplota varu	°C	30-210	160–360	-42	-162	-252,8
Teplota tuhnutí	°C	-40	5 až -20	-187	-182	-259,2
Výparné teplo	kJ/kg	290	180	422	510	447
Výhřevnost	MJ/l (15°C)	31,0–32,9	35,6	23,63	0,034 6,8 (CNG) 22,2 (LNG)	8,5 (kapalná fáze)
Výhřevnost	MJ/kg	42,0–43,5	42,5	46,06	34,091 37,7 (CNG) 54,8 (LNG)	120,05 (kapalná fáze)
Hustota	kg/m ³ (15°C)	720–775	800–845	540 2,25 (plynná fáze při 0 °C a 0,1 MPa)	0,694 180–215 (CNG) 410–500 (LNG)	0,0838
Mez výbušnosti	% hm.	0,7–7	0,6–6,5	2,1–9,4	4,4–15	4–95

Pozn. Uvedené hodnoty jsou vztaženy na normální podmínky, tlak 101.325 kPa.

Tab. 1 - Vybrané fyzikálně-chemické vlastnosti paliv pro spalovací motory. [9]

3 Příprava směsi

Mezi nejdůležitější faktory ovlivňující chod, výkon a emise motoru patří zejména příprava směsi paliva se vzduchem. Spalovací motor používá uhlovodíkové palivo, pro jehož spalování je nezbytný kyslík, který se získává z nasávaného vzduchu. Je potřeba správně vytvořit směs, aby palivo co nejlépe shořelo a dostalo se z něho co nejvíce energie.

Poměr hmotnosti paliva a spalovacího vzduchu udává složení směsi. Optimální složení směsi je pro každý druh motoru jiné. Například pro zážehový motor, spalující automobilový benzín, je optimální, když na 1 kg hmotnosti paliva připadá 14,7 kg vzduchu. Tento poměr se nazývá stechiometrický a dochází při něm k nejúplnějšímu spalování. Jestliže je ve směsi méně vzduchu, je zde tudíž přebytek paliva, směs se označuje za bohatou. Je-li ve směsi vzduchu více než 14,7 kg, je zde tudíž přebytek vzduchu, směs se označuje za chudou.

Aby došlo k nejúplnějšímu spálení směsi, nestačí jen do spalovacího prostoru dostat směs ve správném poměru, ale palivo se musí co nejlépe odpařit a promíchat se vzduchem, aby vznikla tzv. homogenní směs. Dosáhnout tedy ideálních parametrů směsi v každém okamžiku proměnlivého zatížení a stavu motoru není úplně snadné.

Přípravu směsi ovlivňuje mnoho vlivů. Např. při startu studeného motoru na stěnách sacího potrubí kondenzuje palivo a do spalovacího prostoru se ho tedy dostává méně, než by mělo. Studené potrubí a stěny válce motoru totiž způsobují kondenzaci a špatné odpařování paliva, proto musí být při startu studeného motoru dodáváno jeho zvýšené množství. Toto lze částečně eliminovat například zkrácením sacího kanálu mezi zařízením pro tvorbu směsi a spalovacím prostorem motoru. Tento problém se zpravidla řeší takovou konstrukcí motoru, kdy je směs paliva tvořena vstříkovací tryskou těsně před vyústěním sacího kanálu (nepřímé vstříkování paliva do sacích kanálů válců), nebo je tvořena přímo ve válci (přímé vstříkování do válců). Přímé vstříkování má ale na rozdíl od starších systémů přípravy směsi jiné nedostatky, jimiž jsou třeba relativně krátká doba na smíchání paliva se vzduchem a problém jednoduše připravit homogenní směs. Špatně připravená směs se projeví zejména špatnými emisemi. Systémy přímého vstříkování musí tudíž pracovat s mnohem propracovanější, rychlejší a přesnější technikou, než tomu bylo dříve. Používají se například mnohem vyšší tlaky paliva za účelem co nejlepšího rozprášení a smíchání paliva se vzduchem. Z toho vyplývá menší mechanická odolnost moderních systémů pro přípravu směsi a zejména vysoká citlivost na kvalitu a čistotu samotného paliva. Proces přípravy směsi je velice složitý a při vyřešení jednoho problému se zpravidla objeví další neduh. [1]

3.1 Součinitel přebytku vzduchu

Pro znázornění množství vzduchu, které je potřebné pro spalování paliva v motoru, se nejčastěji používá součinitel přebytku vzduchu označovaný písmenem λ . Tato bezrozměrná veličina přímo ukazuje odchylky směsi od teoreticky ideální stechiometrické směsi. [2]

$$\lambda = \frac{m_L}{m_p \cdot L_t} \quad (1)$$

λ součinitel přebytku vzduchu

m_L hmotnost suchého vzduchu ve směsi [kg]

m_p hmotnost paliva ve směsi [kg]

L_t teoreticky ideální stechiometrické množství suchého vzduchu ve směsi [kg/kg]

[3]

Jestliže v předem připravené homogenní směsi je $\lambda < 1$, směs se nazývá bohatou. Při této bohaté směsi za nedostatku vzduchu vznikají produkty nedokonalého spalování, které jsou většinou zdraví škodlivé. U směsí, které jsou mírně bohaté $\lambda \approx 0,9$, je ovšem nejvyšší rychlost šíření plamene a dostává se zde nejvyššího točivého momentu, což bývá výhodné.

Při $\lambda = 1$ jde o stechiometrickou směs. V tomto případě probíhá nejdokonalejší spalování paliva a dnes s ní pracuje převážná většina produkčních zážehových motorů.

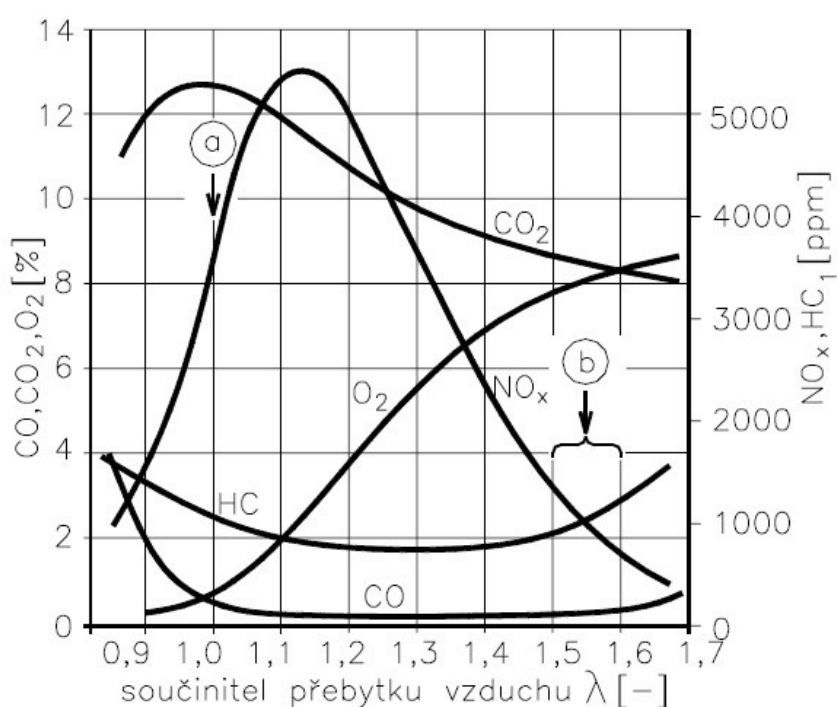
Pro $\lambda > 1$ se používá termín chudá směs. Při malém ochuzení ($\lambda \approx 1,1$) dochází k téměř dokonalému spalování s výhodou úspory paliva. Nevýhodou však je, že v tomto případě oxiduje také vzdušný dusík za vzniku jedovatých oxidů, a to ve zdravotně nebezpečné míře.

V případě kdy je $\lambda > 1,3$ hovoříme o velmi chudé směsi. Velmi chudé, ale i velmi bohaté směsi, hoří pomalu nebo jsou dokonce nezažehnutelné a často u nich dochází ke značně neklidnému chodu a vynechávání zápalů. Čím je energie zdroje zážehu, výhřevnost paliva a tlak i teplota vyšší, tím chudší směs je ještě možné zažehnout. Např. při provozu motoru na dvojí palivo (nafta a zemní plyn) lze pomocí vznícení kapalného paliva vytvořit takovou tepelnou energii, která zažehne i velmi chudou směs zemního plynu o $\lambda = 1,9$. [2]

	Benzín	Nafta	LPG	Zemní plyn	Vodík
L_t	14,7	14,6	15,5	17,2	34

Tab. 2 - Teoreticky ideální stechiometrické množství suchého vzduchu ve směsi pro různá paliva.

V diagramu na obr. 6 jsou vyznačena dvě možná seřízení motoru pro dosažení nízkých výfukových emisí. Závislost byla zjištěna na plynovém přepřlňovaném motoru, spalujícím směs propanu a vzduchu. Oblast označená jako „a“ znázorňuje stechiometrické spalování směsi, při kterém se používá třícestný katalyzátor a využívá se u převážné většiny vozidlových zážehových motorů. Oblast označená jako „b“ znázorňuje spalování extrémně chudé směsi, při kterém se používá dvoucestný katalyzátor a využívá se u vznětových či plynových přepřlňovaných motorů. [3]



Obr. 6 - Závislost koncentrace plyných škodlivin ve výfukových plynech na bohatosti směsi. [3]

4 Výměna náplně válce a regulace dávky paliva

Výměna náplně válce je u pístového spalovacího motoru důležitá fáze, která významně ovlivňuje budoucí spálení nové směsi zajišťující přívod tepla. Úzce tedy souvisí s regulací momentu motoru, která se provádí změnou práce oběhu prostřednictvím přívodu tepla, tudíž regulací dávky paliva.

Pro výměnu náplně válce je zapotřebí zdroj rozdílu tlaků proti okolí pracovního prostoru válce, tedy sacímu a výfukovému traktu. Vlivem rozdílných tlaků se dosáhne odstranění alespoň části výfukových plynů z válce a nahrazení čerstvou náplní. Při vnitřním tvoření směsi se nahradí pouze vzduchem, do kterého je pak následně vstříknuto palivo, nebo přímo směsí, vytvořenou vně pracovního prostoru válce, při vnějším tvoření směsi. Tento rozdíl tlaků je zajištěn samotným atmosférickým tlakem u motorů s přirozeným nasáváním (nepřepřňovaných, s atmosférickým plněním), kde jsou tlaky v okolí válce zhruba atmosférické (ovlivněny tlakovými ztrátami od příslušenství – filtr nasávaného vzduchu, zařízení pro tvorbu směsi, tlumiče sání a výfuku, vlastní ztráty potrubí atp.). Dále může být tlak v sání kromě atmosférického ještě zvýšen použitím zvláštního dmychadla u tzv. přepřňovaných motorů. [2]

4.1 Regulace dávky paliva

Regulace dávky paliva může být realizována několika způsoby.:

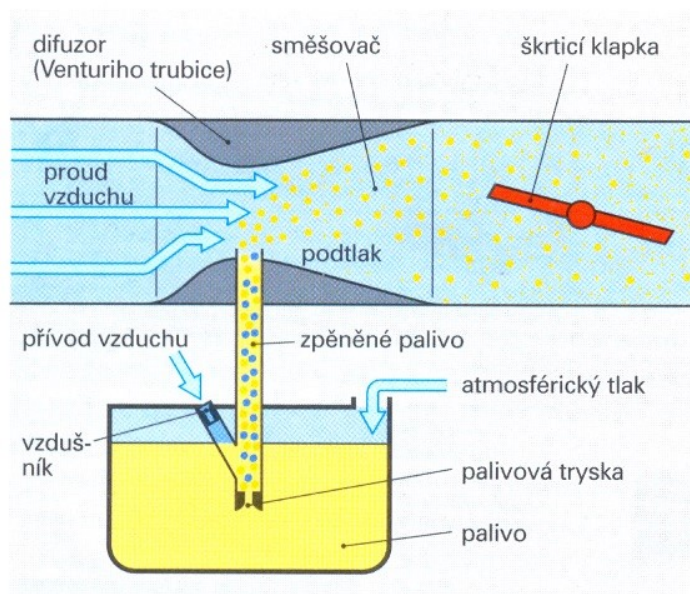
- Regulace kvalitativní (regulace jakosti) – je realizována přímou změnou dávky paliva bez ohledu na množství vzduchu ve válci, tedy změnou výhřevnosti směsi v důsledku změněného přebytku vzduchu podle požadovaného zatížení motoru.
- Regulace kvantitativní (regulace množství) – je realizována současnou změnou dávky paliva a množství vzduchu pro dodržení stálého přebytku vzduchu.
- Kombinovaná či plynulá smíšená regulace – je realizována současnou změnou dávky paliva a množství vzduchu při proměnlivém přebytku vzduchu, a to buď postupným uplatněním obou předchozích způsobů, nebo plynulou změnou přebytku vzduchu.
- Nespojitá regulace odstavením – je realizována zastavením přívodu paliva, případně i přerušením výměny náplně válce. Tato regulace má dnes význam zejména u víceválcových motorů, kde se používá při nízkém zatížení. [2]

Množství nasávaného vzduchu je regulováno škrtkou umístěnou v sacím potrubí. Ta je spojena s plynovým pedálem mechanicky nebo elektronicky a podle sešlápnutí dochází ke změně průřezu v sacím potrubí. U kvantitativního způsobu řízení výkonu v režimu částečného zatížení dochází při výměně náplně ke ztrátám výkonu, ale i k nárůstu spotřeby a emisí, vlivem zmenšeného průřezu sacího potrubí. [2]

5 Systémy na přípravu směsi konvenčních paliv

5.1 Karburátor

Mezi prvními systémy na přípravu palivové směsi byl karburátor, který se v různých vylepšeních, zahrnujících například i osazení elektronickými ovladači, používal u některých vozidel až do začátku 90. let. Základní princip fungování karburátoru využívá tzv. Venturiho efektu, kdy se při nasávání vzduchu do motoru přes trubici se zúžením vytváří v místě zúžení nejvyšší rychlost a největší podtlak, díky kterému se zde přes trysku přisává do proudícího vzduchu palivo z plovákové komory karburátoru, které se rozprašuje na malé kapičky, následně se vypařuje a mísí se vzduchem ve směšovací komoře. Karburátory se používají u zážehových motorů, které spalují palivo s dobrou těkavostí při běžných podmínkách, jímž je zejména automobilový benzín. Výhoda karburátoru je především dobré rozprášení paliva, mechanická jednoduchost a nízká cena. S příchodem přísnějších emisních předpisů, kterých nebylo možné s karburátorem dosáhnout, byly karburátory nahrazovány elektronickým vstřikováním paliva. Kromě starších vozidel mají však karburátory uplatnění dodnes u malých a jednodušších motorů bez elektronické řídicí jednotky. [1, 4, 8]

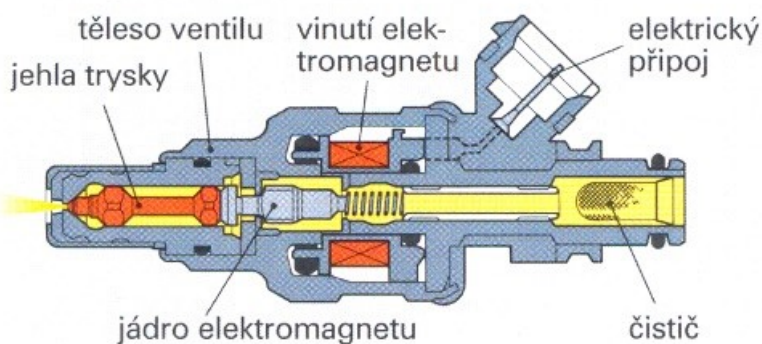


Obr. 7 - Základní princip činnosti karburátoru. [9]

5.2 Nepřímé vstřikování paliva

Již od první poloviny 70. let začaly karburátory nahrazovat systémy s nepřímým vstřikováním paliva. Tento systém vstřikování se používá u zážehových motorů spalujících kapalně (benzín) či plynné palivo. Výjimkou je vznětový motor spalující plynné palivo, u kterého není směs zažehnuta jiskrou od zapalovací svíčky nýbrž vznícením malého množství nafty vstříknutého do válce.

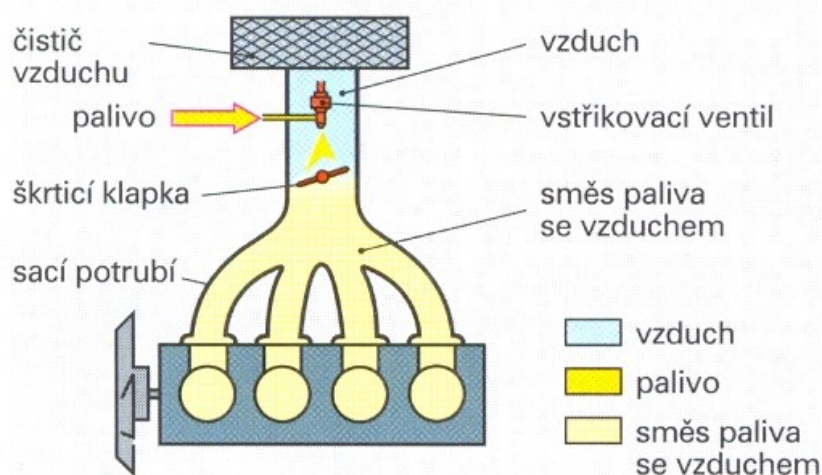
Palivo je vstřikováno tryskou do sacího kanálu. Těchto trysek může být i více, jsou ale vždy umístěny mimo spalovací prostor. Vstřikování umožňuje přesnější regulaci složení palivové směsi v závislosti na zatížení, provozních podmínkách a stavech motoru atp. Přesnější regulace umožňuje také snížení podílu škodlivých emisí a možnost jejich dalšího upravení pomocí katalyzátoru. Oproti karburátorům má vstřikování také výrazný vliv na zlepšení plnění válců, zvýšení měrného výkonu motoru, zvýšení točivého momentu společně se zlepšením jeho průběhu, zlepšení přechodů mezi zatížením motoru, lepší spouštění studeného i zahřátého motoru díky přesnějšímu přizpůsobení dávky paliva a v neposlední řadě také snížení měrné spotřeby paliva až o 20 % zejména při brždění motorem, kdy je vstřikování odstaveno. [1, 4, 8]



Obr. 8 - Elektromagneticky ovládaný vstřikovací ventil pro nepřímé vstřikování benzínu („top – feed“).
[9]

5.2.1 Jednobodové vstříkování

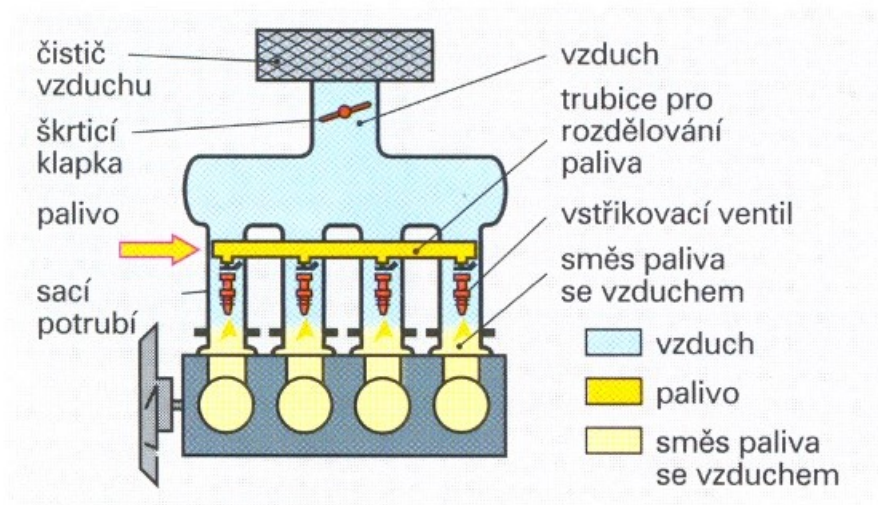
Jednobodové vstříkování (SPI – Single Point Injection, nebo také CPI – Central Fuel Injection) vstříkuje palivo pouze jedním centrálním vstřikovačem, který je umístěn před škrtkicí klapkou a jeho tryska je umístěna tak, aby bylo palivo vstříkováno do průtočných průřezů škrtkicí klapky. Palivo je vstříkováno přerušovaně pomocí trysky ovládané elektromagnetem, k jehož vinutí se přivádí signál z elektronické řídicí jednotky. Množství paliva je regulováno délkou doby otevření trysky a tlakem paliva k ní přiváděného. Proto je v palivovém potrubí zařazen regulátor tlaku paliva, který udržuje v potrubí jeho konstantní tlak. Palivo je čerpáno z palivové nádrže elektrickým čerpadlem, které mu dodává potřebný tlak. V palivovém potrubí se dále nachází filtr, který zachycuje i drobné nečistoty, aby se trysky nezanesly. Tento systém vstříkování je vhodný pro zážehové motory do výkonu 80 kW a mající nejvýše 4 válce. Při vyšším počtu válců nastává problém nerovnoměrného rozdělení připravené směsi pro jednotlivé válce v důsledku odlišné délky sacího potrubí každého válce. Na chladných stěnách potrubí dochází ke kondenzaci kapiček vytvářejících palivový film, který se projevuje nepříznivými účinky zejména v přechodových stavech motoru. Tento systém vstříkování paliva používají například systémy od firmy Bosch (Mono Jetronic, Mono Motronic). [1, 4, 8]



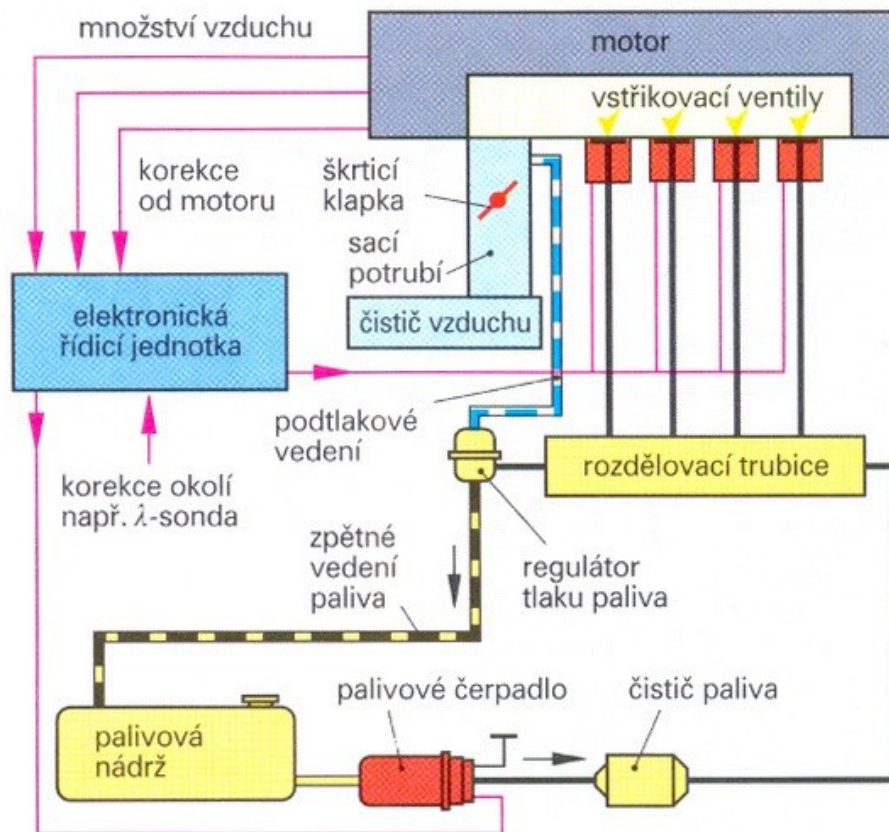
Obr. 9 - Nepřímé vstříkování jednobodové – SPI. [9]

5.2.2 Vícebodové vstřikování

U vícebodového vstřikování (MPI – Multi Point Injection) se palivo vstřikuje přímo před sací ventil příslušného válce. Ke každému válci je tedy přiřazen jeden vstřikovací ventil. Při otevření sacího ventilu strhává proud nasávaného vzduchu kapičky a obláčky palivových par, které pak následujícím vířením se vzduchem v průběhu sacího traktu vytváří dobře zapalitelnou směs. Tím je odstraněn nepříznivý účinek kondenzace paliva na studených stěnách sacího potrubí a zabezpečeno rovnoměrné naplnění jednotlivých válců motoru palivem. Dalším zlepšením oproti karburátorovým a SPI systémům je zkrácení vzdálenosti mezi přívodem paliva a spalovacího prostoru, díky čemuž je zlepšena odezva vůči potřebné změně hlavně během přechodových stavů. Ostatní komponenty palivové soustavy jsou podobné s jednobodovým systémem vstřikování. [1, 4, 8]



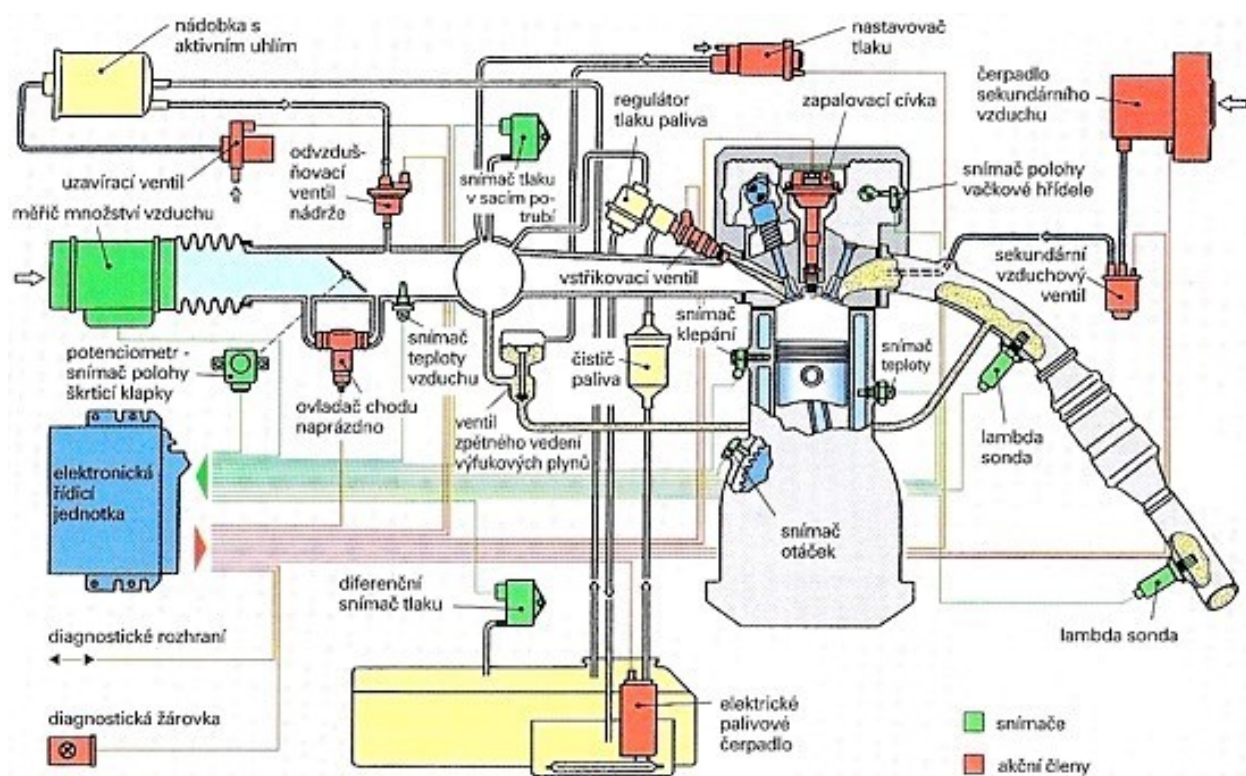
Obr. 10 - Nepřímé vstřikování vícebodové – MPI. [9]



Obr. 11 - Blokové schéma vstřikovací soustavy s elektronickou regulací. [9]

Vstřikování se dělí na simultanní, kdy se palivo vstřikuje ze všech vstřikovačů zároveň, skupinové, kdy se palivo vstřikuje nejčastěji v párových skupinách a sekvenční, kdy se palivo vstřikuje do jednotlivých válců bezprostředně před začátkem sání nezávisle na ostatních válcích. U modernějších systémů se dávka paliva rozděluje až na 3 části. Kromě zlepšení vnitřního chlazení motoru se tím docílí hlavně rovnoměrné přípravy směsi, která je pro všechny válce stejná. Sekvenční vstřikování je ze všech tří uvedených systémů technicky nejsložitější, ale z hlediska rovnoměrnosti chodu motoru, výkonu, spotřeby a emisí nejdokonalejší. [1, 2, 4, 8]

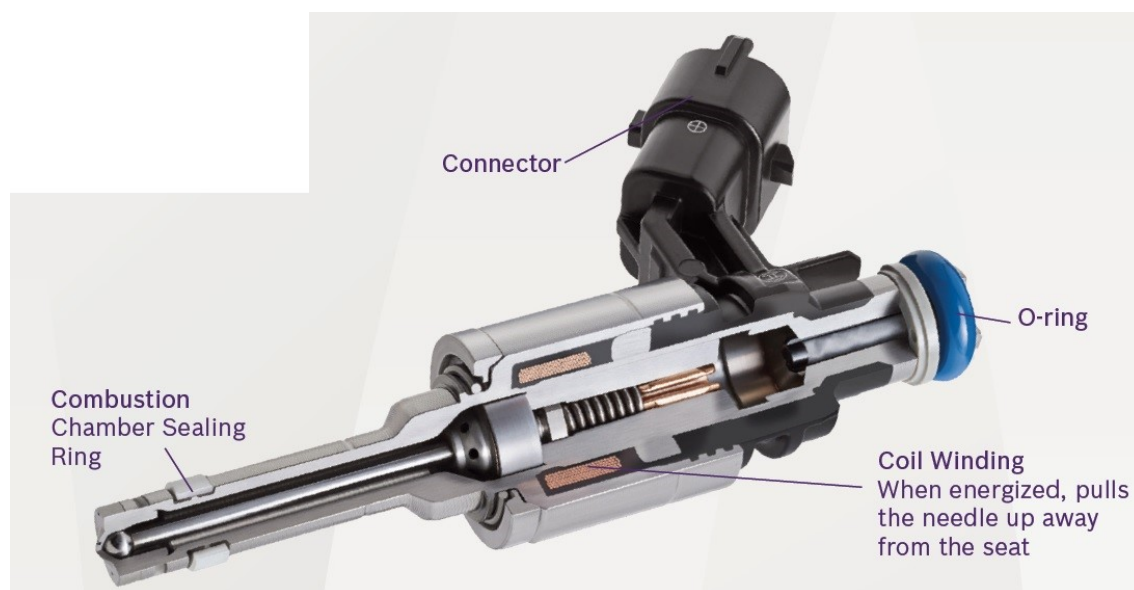
Příkladem nepřímého vícebodového vstřikování může být Bosch Motronic. Hlavním úkolem tohoto systému je řízení zapalování a vstřikování. Palivo je vstřikováno v přesně odměřeném množství, které je ve správném poměru s hmotnostním množstvím nasávaného vzduchu udávaného speciálním snímačem. Vstřikovací tlak dodávaný čerpadlem z nádrže je udržován na konstantním přetlaku 0,4 MPa oproti tlaku vzduchu v sacím potrubí. Množství vstřikovaného paliva je potom závislé pouze na celkové době otevření vstřikovacího ventilu. Na funkci regulovaného vstřikování, propojeného se systémem řízeného zapalování, se podílí mnoho snímačů znázorněných na obrázku č. 12. [1, 2, 4, 8]



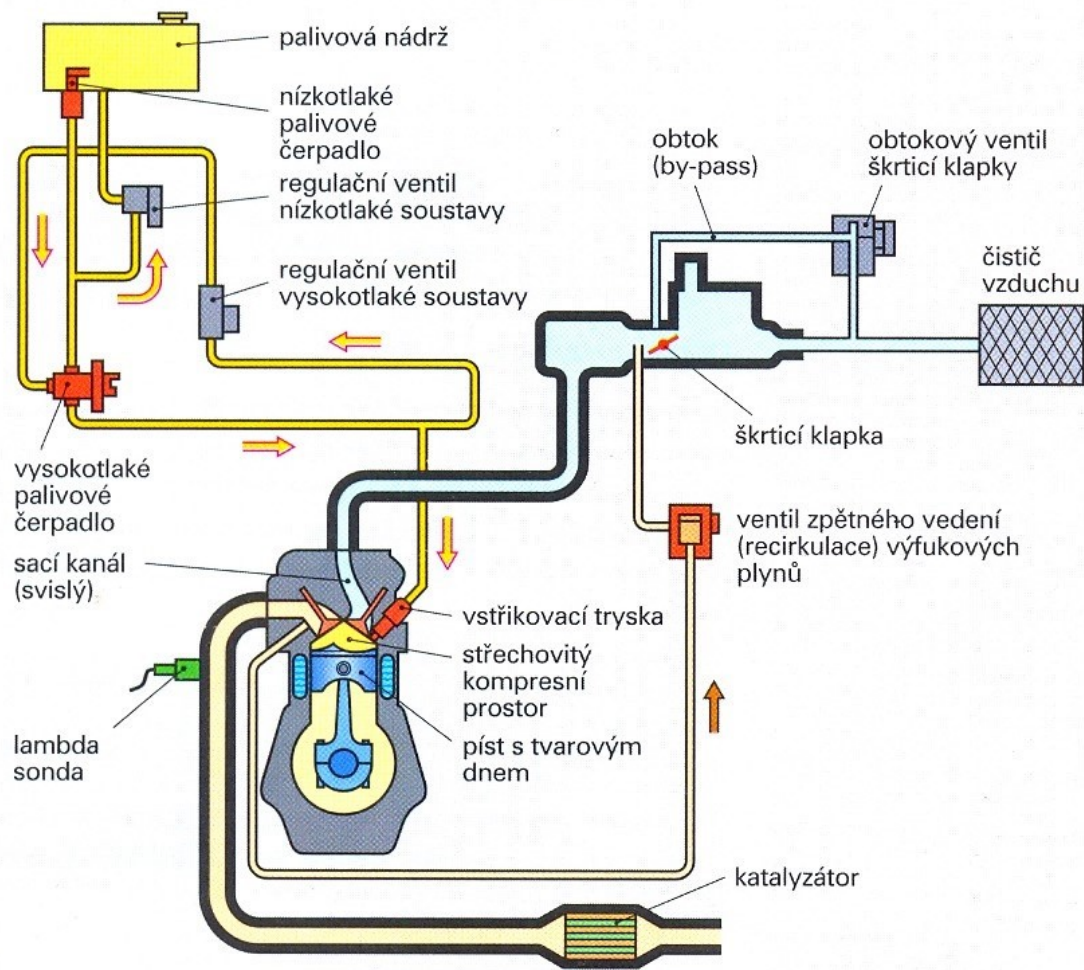
Obr. 12 - Schéma snímání parametrů a řízení vstřikování benzínu a zapalování Bosch Motronic. [9]

5.3 Přímé vstřikování

U tohoto typu vstřikování (GDI – Gasoline Direct Injection) je palivo vstřikováno sekvenčně přímo do jednotlivých válců motoru, kde se promísí se vzduchem. Vstřikuje se nejčastěji kapalné palivo, jako je např. benzín a motorová nafta. U zážehového motoru je nežádoucí vysoká teplota při kompresi směsi ve spalovacím prostoru, neboť může v motoru docházet k detonačnímu spalování, na rozdíl od vznětového, kdy je zapotřebí vysokého kompresního poměru pro dosažení vysoké teploty za účelem vznícení paliva. Jedna z výhod přímého vstřikování je, že se kapalné palivo odpařuje přímo ve válci a tím se zlepšuje vnitřní chlazení motoru, které eliminuje výskyt detonačního spalování. Díky tomu je možné zvýšit kompresní poměr až na 1:12 a dosáhnout tak vyšší účinnosti motoru.

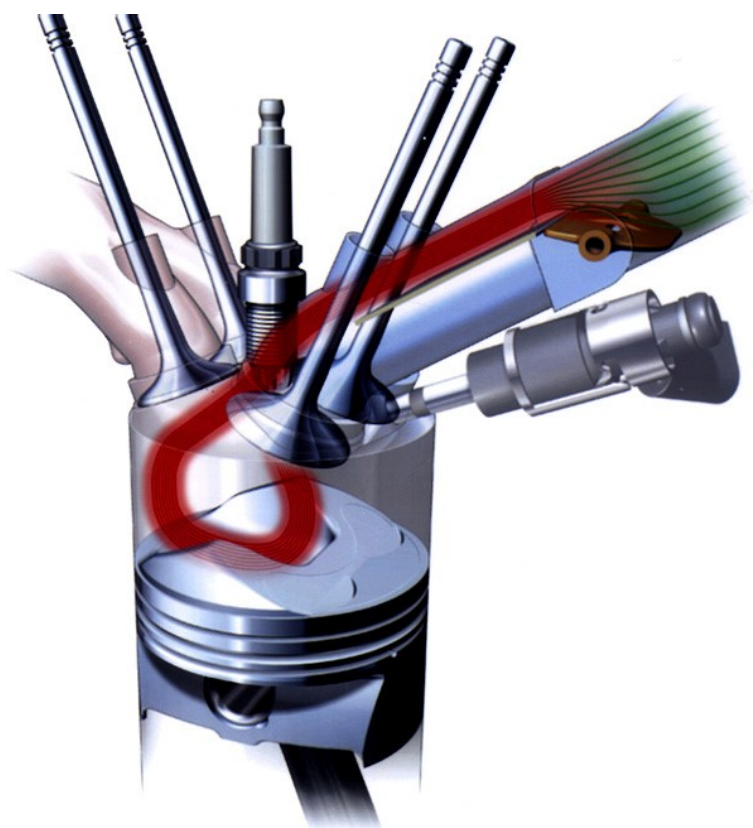


Obr. 13 – Řez vysokotlakým vstřikovacím ventilem pro přímý vstřik benzínu od výrobce Bosch. [21]



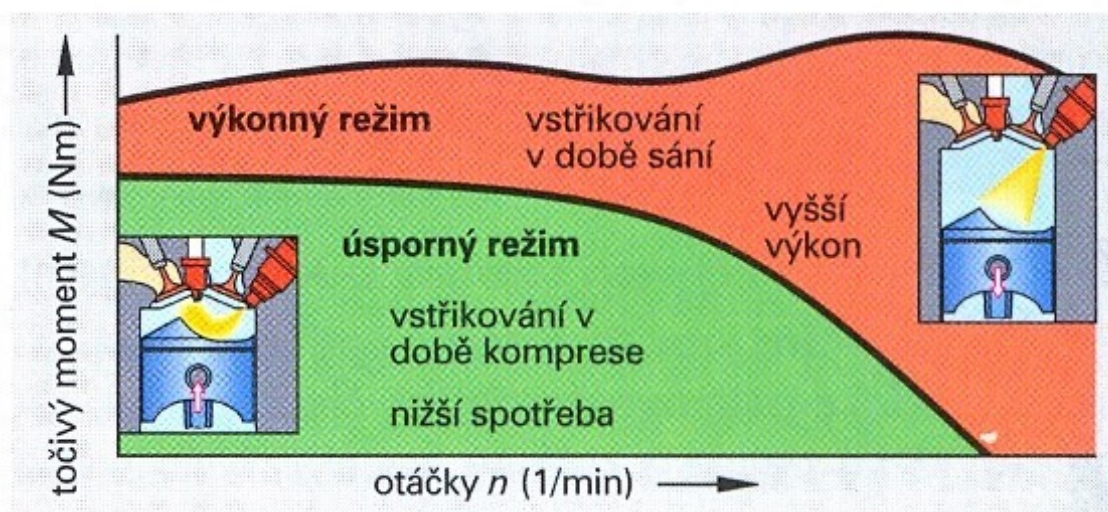
Obr. 14 - Schéma přímého vstříkování benzínu, systém GDI. [9]

Systém přímého vstřikování paliva klade vysoké nároky na optimalizaci tvaru částí motoru, které se podílejí na proudění vzduchu nasávaného do válce, promísení paliva se vzduchem a výsledném průběhu hoření. Proto bývají sací kanály včetně pístů přesně tvarovány (u systému GDI jsou téměř svislé) a případně vybavovány přídatnou škrtkící klapkou (FSI). Za účelem jemnějšího rozprášení paliva probíhajícího ve velmi krátkém časovém intervalu se musel zvýšit i vstřikovací tlak na hodnoty od 5 MPa (GDI) až po dnešních 35 MPa (TSI).



Obr. 15 - Činnost klapky v sacím potrubí při plnění válce v úsporném režimu FSI. [11]

Zážehový motor s přímým vstřikováním pracuje převážně s kvalitativní regulací dávky paliva. Není tedy omezováno množství vzduchu proudícího do válců, což při částečném zatížení snižuje ztráty výkonu výměnou náplně válce. Tvorba směsi je rozdílná v režimu nízkého zatížení, kdy se z celkově velmi chudé směsi soustřeďuje bohatší směs pouze v malém okolí zapalovací svíčky (tzv. vrstvení směsi), a v režimu vysokého zatížení, kdy motor pracuje s homogenní stechiometrickou směsí v celém objemu. Ve srovnání se systémem MPI lze díky provozu na velmi chudou směs dosáhnout snížení spotřeby paliva o 10 až 16 % při trvalém snížení emisí CO₂. Pro snížení odvodu tepla stěnami válce za účelem zvýšení termodynamické účinnosti se používají různé typy recirkulace výfukových plynů. [1, 2, 4, 8]



Obr. 16 - Činnost systému GDI ve výkonnostním a úsporném režimu. [9]

6 Systémy na přípravu směsi LPG

LPG (Liquefied Petroleum Gas), neboli zkapalněný ropný plyn, je směs propanu a butanu, která tvoří zápalnou směs se vzduchem. Používá se mimo jiné pro pohon motorových vozidel. Fyzikálně-chemické vlastnosti LPG včetně vozidlových nádrží byly zmíněny v kapitole 2.5.1.

6.1 Mechanicky řízený systém s podtlakovou regulací a centrálním směšovačem

Tento systém je nejstarší, nejjednodušší a nejlevnější. Je určen pro zážehové motory s karburátorem, bez katalyzátoru a bez elektronické regulace bohatosti směsi. Systém je regulován podtlakem pomocí hadičky spojující sací potrubí a regulátor tlaku. Kapalné LPG prochází regulátorem tlaku až do reduktoru (zplynovače), kde dochází ke změně stavu paliva z kapalné fáze na plynnou, proto musí být reduktor vyhříván chladícím okruhem motoru. Plyn pak postupuje přes škrtkový prvek do centrálního směšovače, umístěného v sání před škrtkovou klapkou, kde dochází ke správnému promíchání se vzduchem. Směšovač má stejnou funkci jako karburátor či vstřikovací ventil při použití benzínu. [9]

6.2 Elektronicky řízený systém s podtlakovou regulací a centrálním směšovačem

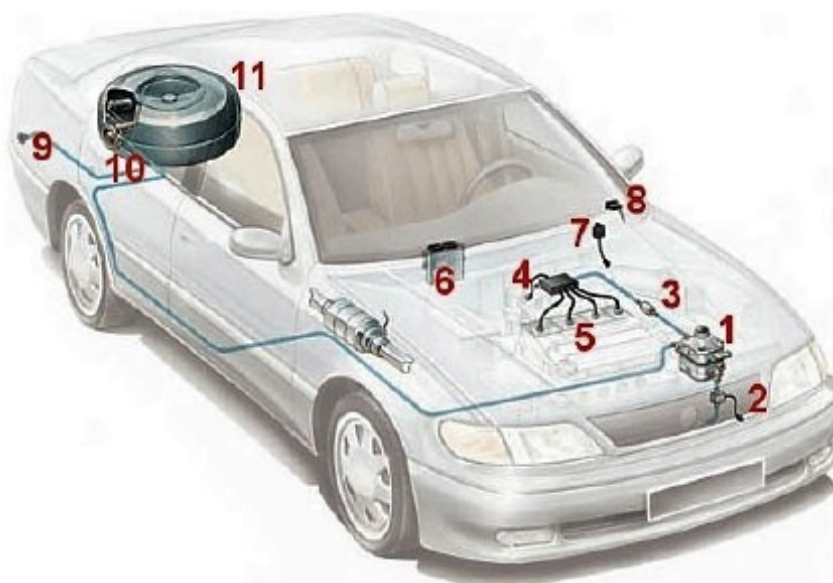
Tento systém je určený pro vozidla vybavená katalyzátorem a elektronicky řízenou přípravou stechiometrické směsi (lambda sondou). Je využíván u většiny starších vozidel s jednobodovým, či vícebodovým vstřikováním. Tento elektronický systém funguje na podobném principu jako mechanický. Na rozdíl od mechanického systému však zahrnuje i elektronickou řídicí jednotku LPG, která ovládá ventilek s krokovým motorkem regulující průtok plynu do centrálního směšovače. Řídicí jednotka LPG spolupracuje s benzínovou a společně ovládají celý systém motoru. Oproti mechanicky řízenému systému je s tímto možné dosáhnout vyšších výkonů, nižší spotřeby a lepších emisí. [9]

6.3 Systém s elektronicky řízeným vícebodovým kontinuálním vstřikováním plynu

Příprava plynu pro následné smísení se vzduchem je u tohoto systému prakticky shodná jako u klasického podtlakového systému, kde je využíván zplynovač s reduktorem tlaku. Plyn pak dále proudí z reduktoru do tzv. distributoru a je rozváděn k jednotlivým tryskám, které pouze vstřikují plyn do sacích kanálů bez jakékoliv další regulace. Všechny regulační a dávkovací funkce zajišťuje distributor. Dávkování paliva je řízeno samostatnou řídicí jednotkou na základě signálů z lambda sondy katalyzátoru výfukových plynů ve spolupráci s benzínovou řídicí jednotkou, která poskytuje ještě další provozní informace. [9]

6.4 Systém s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním vstřikováním plynu

Tato varianta se považuje za dosud nejdokonalejší systém vstřikování plynné fáze paliva. Systém sekvenčního vstřikování plynu se liší od ostatních tím, že dávkuje a vstřikuje palivo do sacích kanálů pro každý válec zvlášť. Toto dávkování je řízeno benzínovou řídicí jednotkou, která předává řídicí jednotce LPG informace o délce vstřiku paliva. Tento systém nevyžaduje lambda sondu a je možné ho instalovat až do dvanáctiválcových motorů včetně motorů s turbodmychadlem. U přestaveb motorů s přímým vstřikem paliva (FSI, TSI, GDI) dochází k částečné spotřebě benzínu, z důvodu nutnosti chlazení benzínových vstřikovačů. Je to dnes nejpoužívanější systém vstřikování plynu, a to nejen díky výkonu i spotřebě motoru srovnatelné s provozem na benzín, ale i příznivé cenové dostupnosti. [9]



- 1 – **reduktor**: dvoustupňový membránový zplyňovač LPG vyhříváný chladicí kapalinou z okruhu chlazení motoru regulující tlak plynné fáze na hodnotu 195 – 200 kPa při jmenovitém průtoku kapalné fáze 40 kg/h
- 2 – **čidlo teploty chladicí kapaliny**: poskytuje signál řídicí jednotce
- 3 – **filtr LPG**: pro zachyt pevných částic >80 μm, max. provozní tlak 250 kPa
- 4 – **vstřikovací lišta**: rozvádí plynnou fázi (max. tlak 250 kPa) k jednotlivým vstřikovacím tryskám, zabudovaná snímací čidla pro měření tlaku a teploty plynného LPG
- 5 – **vstřikovací trysky**: přímo elektronicky ovládaný řídicí jednotkou LPG
- 6 – **řídicí jednotka LPG**
- 7 – **snímač tlaku v sání vozidla**: měří rozdíl tlaku vzduchu v sání vozidla a plynu ve vstřikovací liště, poskytuje signál řídicí jednotce
- 8 – **přepínač BA / LPG**: umístěn v zorném poli řidiče, po startu zabezpečuje automatické přepnutí z benzinového na LPG pohon a zpětné přepnutí na benzinový pohon při problémech s LPG pohonem
- 9 – **plnicí hrdlo**
- 10 – **multiventil**: víceúčelový ventil pevně spojený s nádrží. Jeho součástmi jsou stavoznak (tlakoměr) a plynotěsná schránka. Multiventil zajišťuje funkce provozní (odebírání LPG z nádrže, její plnění, stavoznak ukazuje stav paliva v nádrži) a bezpečnostní (zastavení toku paliva při poruše zařízení, vypouštění LPG při přetlaku vyšším než 2,5 MPa do prostoru pod vozidlem)
- 11 – **nádrž**: pevně zabudovaná ve vozidle, válcového tvaru, zkoušená na přetlak 3 MPa, nejvyšší provozní přetlak je 2,5 MPa. Nádrž je plněna pouze do 80 %. Obvyklá velikost nádrží je 45 – 60 l.

Obr. 17 - Schéma plynové zástavby s vícebodovým sekvenčním vstřikováním LPG. [9]

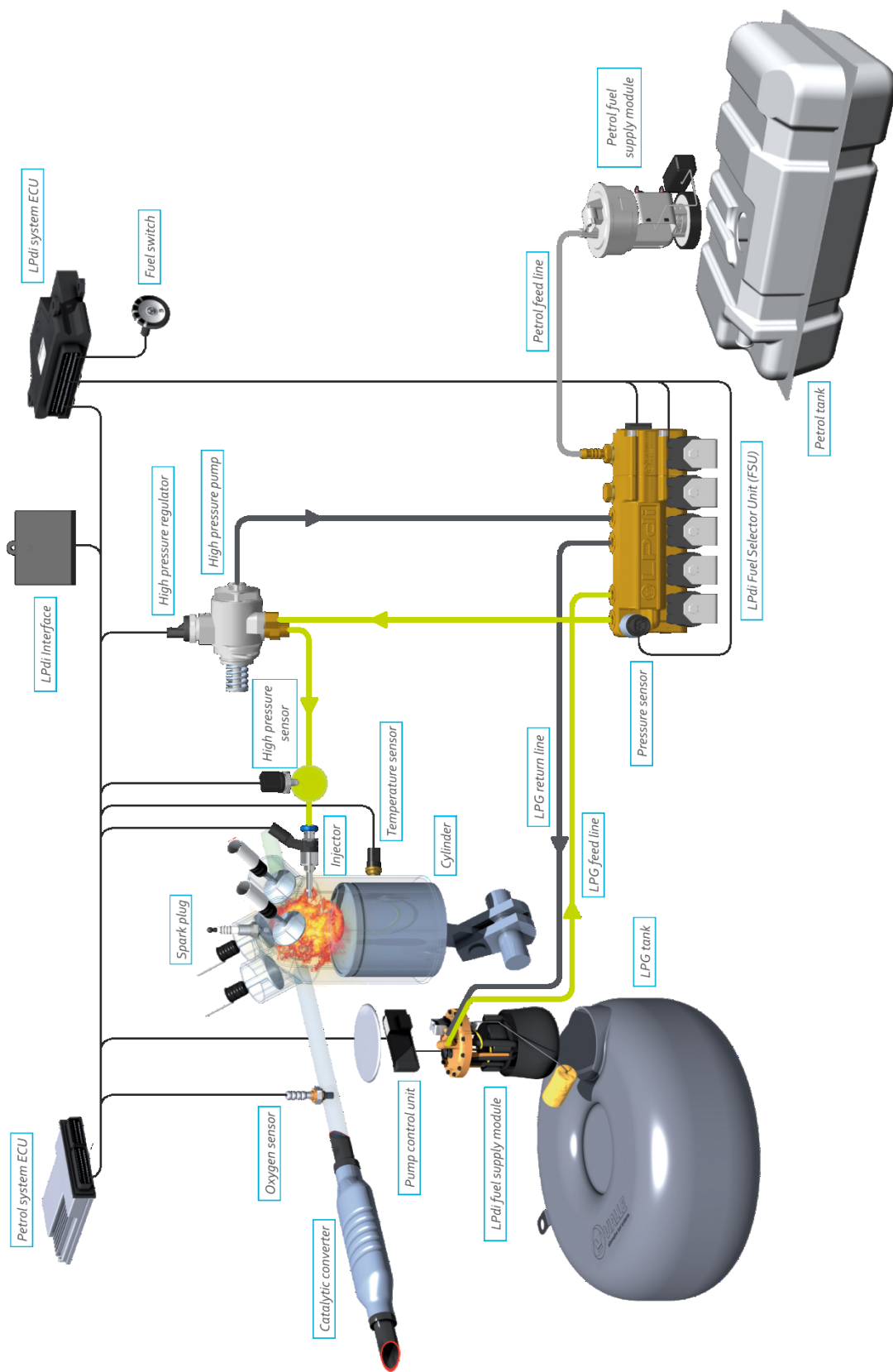
6.5 Systém s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním vstřikováním kapalné fáze plynu

Tento systém pracuje na podobném principu jako systém předchozí s rozdílem, že do sacích kanálů vstřikuje kapalné LPG. Z toho vyplývá výhoda v podobně ochlazení směsi vstupující do válce a zrušení potřeby vyhřívát systém chladícím okruhem motoru. Aby nedocházelo ke zplynování v palivovém potrubí, musí být umístěno v nádrži palivové čerpadlo zajišťující tlak přibližně 1 MPa. [7, 9]

6.6 Systém přímého sekvenčního vstřikování kapalné fáze plynu řízeného elektronicky

U tohoto systému se zkapalněné LPG vstřikuje přímo do válce. Nabízí tedy výhody přímého vstřikování. Mezi tyto výhody patří například ochlazení spalovacího prostoru a nasávaného vzduchu, jelikož palivo odebírá teplo, které je potřebné k jeho vypaření. Díky tomu je možné pracovat s vyššími tlaky a kompresním poměrem, což zvýší tepelnou účinnost motoru. Dále je také možné používat technologii vrstvení směsi, kdy je směs nehomogenní a dostatečně bohatá pro zapálení jen v okolí zapalovací svíčky.

Společnost Vialle jako první nabídla tento systém vstřikování a nazývá ho LPdi. Tento systém se nabízí zejména jako přestavba pro benzínové motory s přímým vstřikem paliva. Využívá plno originálních komponentů, které jsou součástí motoru už od výroby, jako například vysokotlaké palivové čerpadlo, vstřikovače a senzor tlaku paliva. Vysokotlaké palivové čerpadlo musí být doplněno o zpětné vedení paliva a regulátor tlaku paliva. Hlavní částí tohoto typu vstřikování je patentovaný systém FSU „Fuel Selector Unit“, který umožňuje hladké přepínání mezi provozem na benzín nebo LPG. Od této části proudí zvolené palivo do vysokotlakého palivového čerpadla, kde se zvýší tlak až na více jak 10 MPa. Pod tímto vysokým tlakem se pak palivo vstřikuje přímo do válce. [18]



Obr. 18 – Schéma LPdi systému od společnosti Vialle. [18]

7 Systémy na přípravu směsi zemního plynu

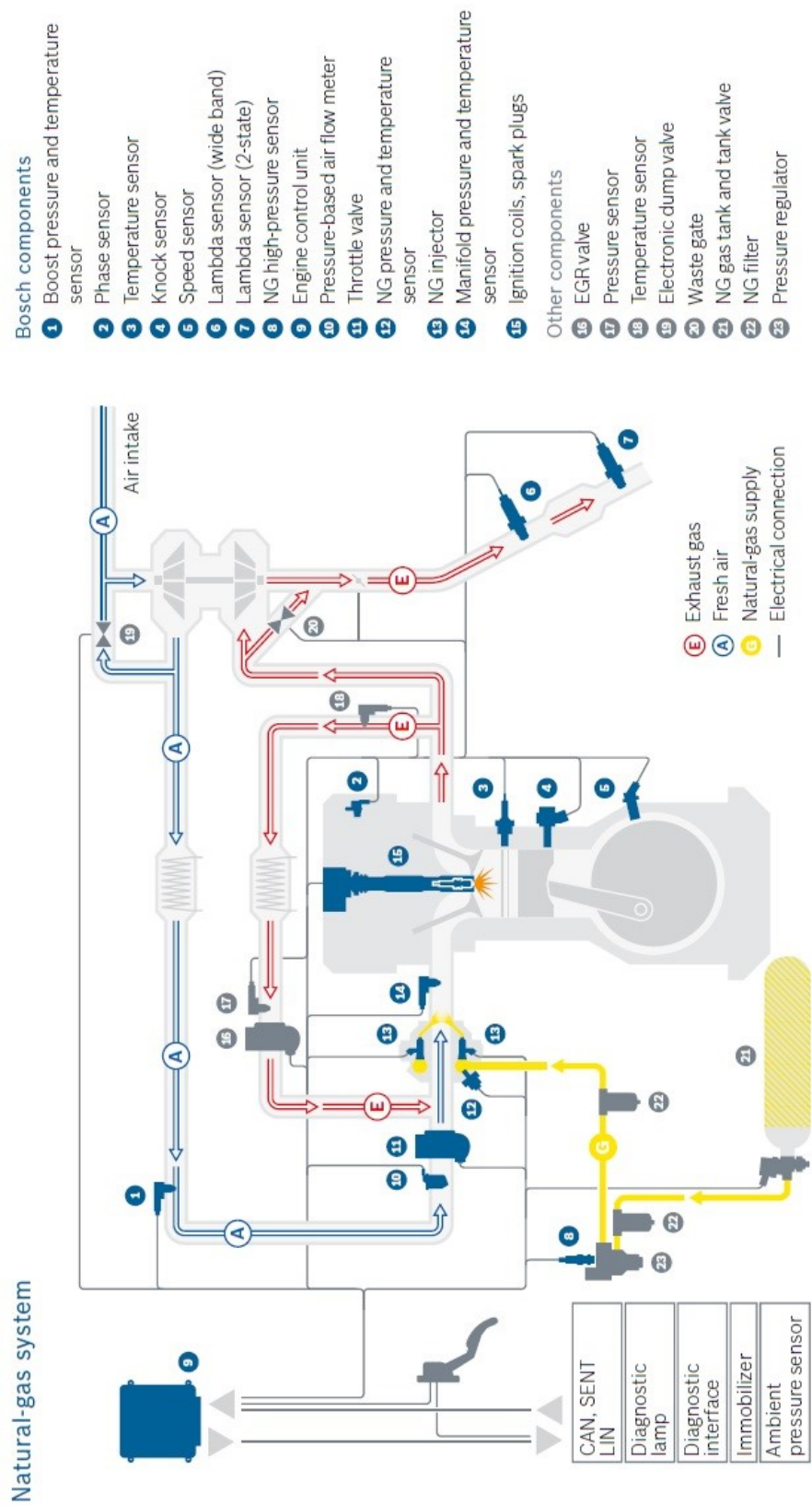
V České republice obsahuje zemní plyn více jak 90 % obj. metanu a méně než 5 % nehořlavých látek. Metan (CH_4) je jednoduchý uhlovodík bez barvy a zápachu, je hořlavý a se vzduchem vybuchující plyn. Kromě použití jako topného plynu v domácnostech se využívá také jako pohonná hmota spalovacích motorů ve vozidlech. Zápalná teplota zemního plynu je oproti benzínu dvojnásobná, což klade větší nároky na technologii zapalování. Fyzikálně-chemické vlastnosti zemního plynu byly zmíněny v kapitole 2.5.2. [7, 9]

7.1 Systém na přípravu směsi stlačeného zemního plynu CNG

Tento systém funguje na podobném principu jako systémy na přípravu LPG. Kromě odlišných pracovních tlaků je však palivo u systémů CNG již v plynném stavu, proto není potřeba zplynovač (reduktor). Tlak v nádrži je více jak dostatečný pro dopravu do palivového systému, kde se dále ještě snižuje pomocí regulátoru tlaku. Stlačený zemní plyn (přibližně 20 MPa) se prostřednictvím vysokotlakého potrubí dostává do vysokotlakého regulátoru, který redukuje tlak plynu na potřebný provozní tlak (obvykle 0,8 MPa). Při snižování tlaku (expanzi) dochází k ochlazení plynu, a proto musí být regulátor, či vstřikovací tryska ohřívána. Zpravidla je ohřívána chladicí soustavou motoru. V případě systému s centrálním směšovačem dále plyn pokračuje do směšovače ovládaného krokovým motorkem na základě signálů z řídicí jednotky. V případě systému s elektronicky řízeným vícebodovým sekvenčním vstřikováním plynu pokračuje dále plyn k elektronickým vstřikovačům, které vstřikují plyn buď před sací ventily jednotlivých válců nebo přímo do válců. Vlastnosti vozidlových nádrží na CNG byly zmíněny v kapitole 2.5.2.1. [7, 9]



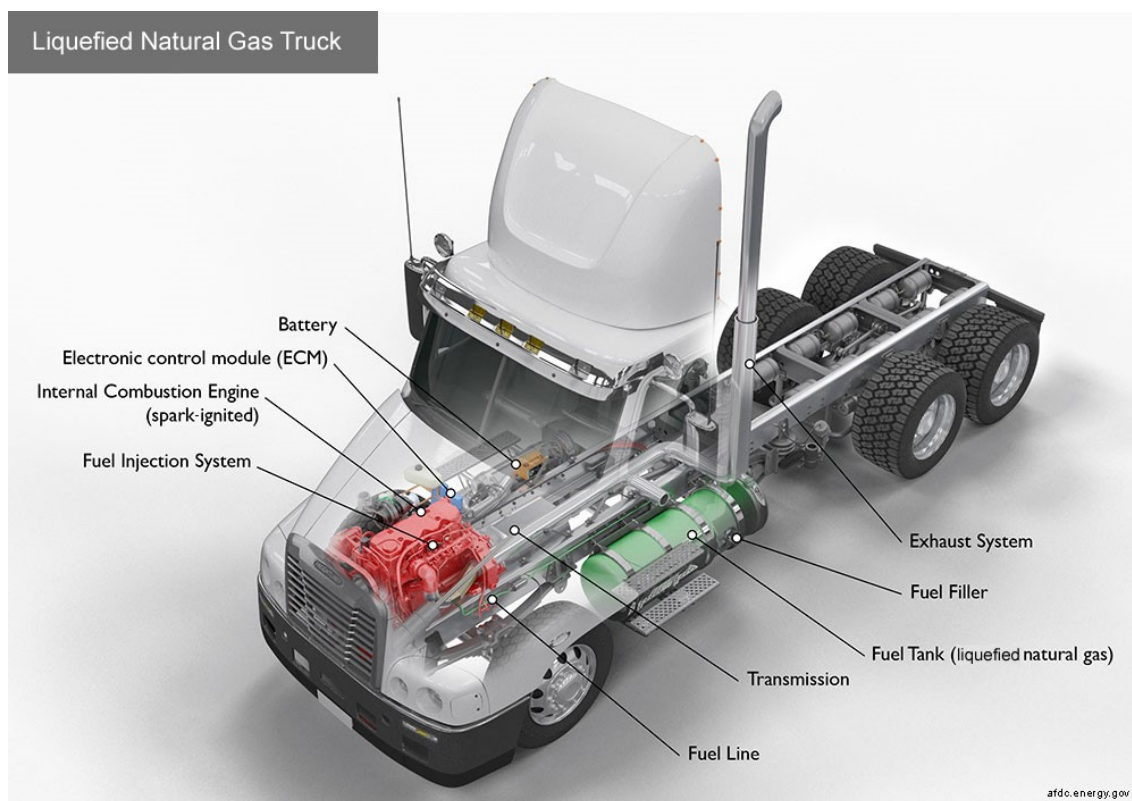
Obr. 19 - Vstřikovač zemního plynu Bosch NGI2. [15]



Obr.20 - Schéma motoru na zemní plyn se systémem Bosch. [15]

7.2 Systém na přípravu směsi zkapalněného zemního plynu LNG

S výjimkou odpařovače a LNG nádob je technologie LNG podobná jako u CNG vozidel. Podobná tedy jako technologie pro přípravu směsi LPG. Odpařovač slouží pro přeměnu kapalného skupenství na plynné. Při odpařování vzroste i tlak. Aby se plyn odpařil, je nutné dodávat do odpařovače teplo, což bývá nejčastěji realizováno chladicí soustavou motoru. Produkční vozidla na LNG tedy vstříkují plynný zemní plyn taktéž jako vozidla na CNG. Velkým přínosem pro účinnost motoru by byl systém přímého vstříkávání zkapalněného zemního plynu do válců. Tento systém se však kvůli vlastnostem zemního plynu (kap. 2.5.2), ze kterých plynou vysoké náklady na technologii a materiály, v dnešní době nepoužívá. Při delší odstavce vozidla dochází k samovolnému odparu, přičemž se v nádrži zvýší tlak a aby nedošlo k poškození, upustí se plyn do atmosféry. Vlastnosti vozidlových nádrží na LNG byly zmíněny v kapitole 2.5.2.2. [7, 9]



Obr. 21 - Ukázka tahače na LNG, který se používá v USA. [16]

8 Určení velikosti vstřikovacích jednotek pro různé typy paliv

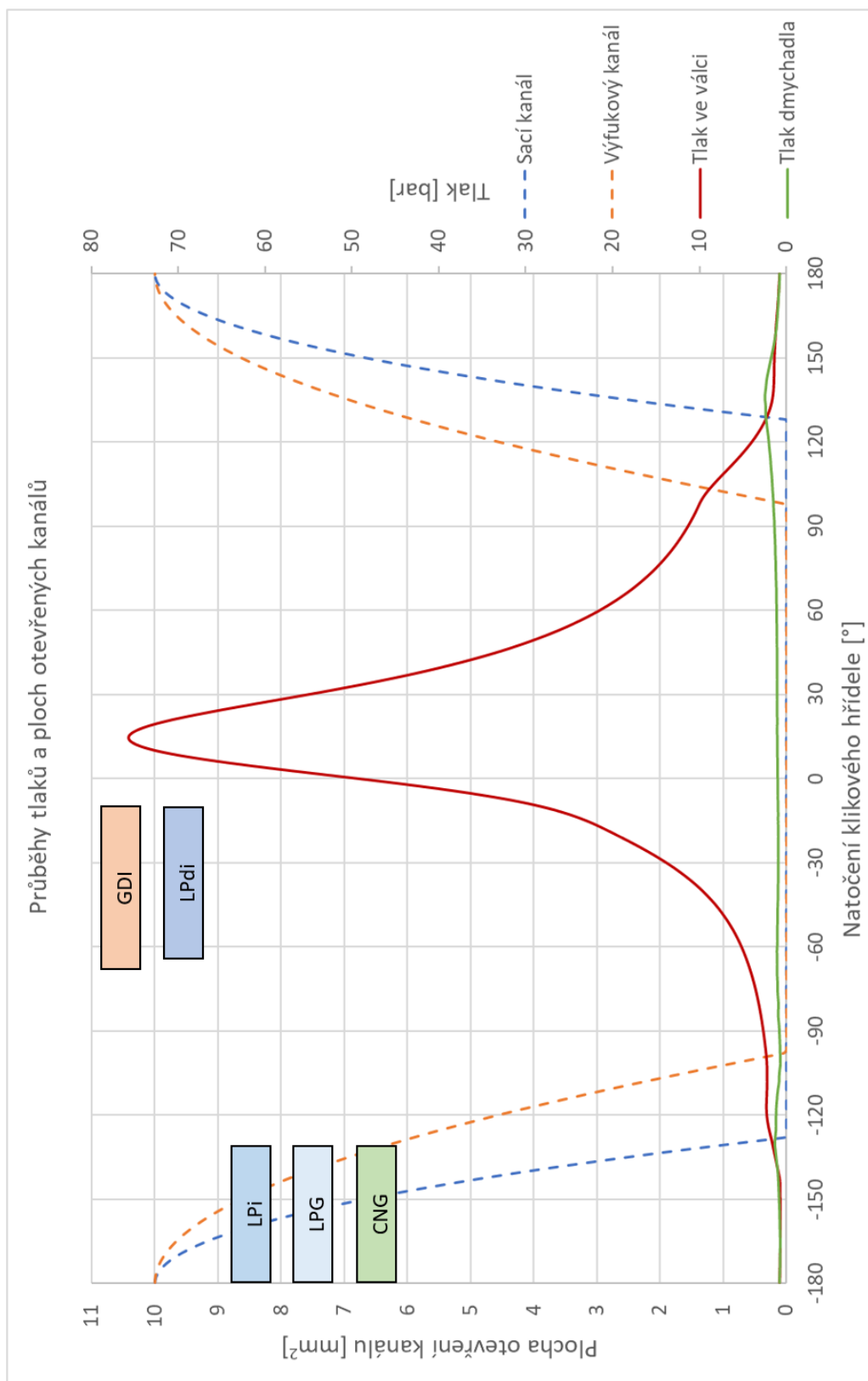
Vypočet vstřikovacích jednotek jsem provedl pro zadaný jednoválcový dvoudobý motor o předpokládaném výkonu 15,5 kW při 3000 ot./min, se zdvihovým objemem 250 cm³, kompresním poměrem 10:1 a vrtáním o průměru 70 mm.

Tento motor je zatím pouze virtuální. Část parametrů je tedy vypočtená na základě dat z virtuálního modelu a část je odhadnutá. Výpočty jsou idealizované a provedené na základě vzorců z informačního zdroje [2]. Přibližné hustoty plynů lze získat pomocí stavové rovnice ideálního plynu, či z internetové aplikace „Gas density calculator“ [17]. Tepelná kapacita při stálém tlaku plynu v závislosti na teplotě lze získat z elektronických tabulek [20]. Z té je možné následně dopočítat Poissonovu plynovou konstantu. Tlakový poměr jsem počítal jako kompresní tlak ku tlaku v trysce. Přepočet tlaku zadaného v barech jsem prováděl jednoduchým převodem 1 bar = 0,1 MPa.

Varianta	Přímé vstřikování benzínu	Přímé vstřikování kapalného LPG	Nepřímé vstřikování kapalného LPG	Nepřímé vstřikování plynného LPG	Nepřímé vstřikování CNG
Výkon motoru P_e [kW]	15,50	15,50	15,50	15,50	15,50
Otáčky motoru n_M [min ⁻¹]	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00	3000,00
Dolní výhřevnost paliva H_u [MJ·kg ⁻¹]	42,00	46,06	46,06	46,06	34,09
Hustota paliva ρ_{pal} [kg·m ⁻³] (15 °C)	750,00	540,00	540,00	5,19	5,36
Efektivní účinnost motoru η_e [%]	19,00	19,00	19,00	19,00	19,00
Úhel vstřiku $\phi_{vstř}$ [°]	60,00	55,00	50,00	50,00	50,00
Tlak v trysce p_t [MPa]	20,00	10,00	1,50	0,25	0,80
Kompresní tlak p_k [MPa]	1,67	1,24	0,09	0,09	0,09
Teplota paliva T_p [°C]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00

Varianta	Přímé vstřikování benzínu	Přímé vstřikování kapalného LPG	Nepřímé vstřikování kapalného LPG	Nepřímé vstřikování plynného LPG	Nepřímé vstřikování CNG
Molekulová hmotnost plynu M_m [kg·mol ⁻¹]	-	-	-	49,70	16,04
Měrná plynová konstanta r [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	-	-	-	167,27	518,33
Tepelná kapacita při stálém tlaku plynu c_p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	-	-	-	1633,40	2181,69
Poissonova plynová konstanta κ [1]	-	-	-	1,11	1,31
Tlakový poměr ε [1]	-	-	-	0,36	0,11
Průtokový koeficient trysky μ_t [1]	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60

Tab. 3 – Zvolené parametry vstřikování.



Obr. 22 – Graf získaný z dat virtuálního modelu motoru s vyznačeným intervalem vstřiku paliv.

Příloha č. 2.

8.1 Výpočet potřebných tlakových spádů

Výpočet potřebného tlakového spádu se vypočte ze vzorce

$$\Delta p = p_t - p_k, \quad (2)$$

kde Δp je potřebný tlakový spád, p_t je tlak v trysce a p_k je kompresní tlak.

Výpočet kompresních tlaků jsem počítal z dat získaných z virtuálního modelu motoru, přičemž maximální tlak ve válci je při 14,5° natočení klikového hřídele s hodnotou $p_{kmax} = 7,578 \text{ MPa}$.

Přímé vstřikování benzínu.:

Pro tlak v trysce uvažuji tlaky používané v dnešních systémech $p_{tben} = 20 \text{ MPa}$.

Pro kompresní tlak uvažuji průměrnou hodnotu tlaku při úhlu vstřiku 60°, respektive při natočení klikového hřídele od -70° až po -10°, tedy $p_{kben} = 1,67 \text{ MPa}$.

Přímé vstřikování kapalného LPG.:

Pro tlak v trysce uvažuji tlaky používané v dnešních systémech $p_{tLPdi} = 10 \text{ MPa}$.

Pro kompresní tlak uvažuji průměrnou hodnotu tlaku při úhlu vstřiku 55°, respektive při natočení klikového hřídele od -65° až po -10°, tedy $p_{kLPdi} = 1,24 \text{ MPa}$.

Nepřímé vstřikování kapalného LPG.:

Pro tlak v trysce uvažuji tlaky používané v dnešních systémech $p_{tLPi} = 1,5 \text{ MPa}$.

Pro kompresní tlak uvažuji průměrnou hodnotu tlaku dmyhadla při úhlu vstřiku 50°, respektive při natočení klikového hřídele od -180° (všechny kanály uzavřeny) až po -130°, tedy $p_{kLPi} = 0,09 \text{ MPa}$.

Nepřímé vstřikování plynného LPG.:

Pro tlak v trysce uvažují tlaky používané v dnešních systémech
 $p_{tLPG} = 0,25 \text{ MPa}$.

Pro kompresní tlak uvažují průměrnou hodnotu tlaku dmyhadla při úhlu vstřiku 50°, respektive při natočení klikového hřídele od -180° (všechny kanály uzavřeny) až po -130°, tedy $p_{kLPG} = 0,09 \text{ MPa}$.

Nepřímé vstřikování plynného CNG.:

Pro tlak v trysce uvažují tlaky používané v dnešních systémech
 $p_{tCNG} = 0,8 \text{ MPa}$.

Pro kompresní tlak uvažují průměrnou hodnotu tlaku dmyhadla při úhlu vstřiku 50°, respektive při natočení klikového hřídele od -180° (všechny kanály uzavřeny) až po -130°, tedy $p_{kCNG} = 0,09 \text{ MPa}$.

8.2 Názorný výpočet pro vstřikování kapalného paliva, u kterého lze pro prvotní výpočty zanedbat vliv stlačitelnosti.

Tento konkrétní výpočet je pro přímé vstřikování benzínu. Obdobným způsobem jsem postupoval při výpočtech přímého vstřikování kapalného LPG a nepřímého vstřikování kapalného LPG.

Měrná efektivní spotřeba paliva.:

$$m_{pe} = \frac{3600}{H_u \cdot \mu_e} = \frac{3600}{42 \cdot 10^6 \cdot 0,19} \cdot 10^6 = 451,128 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \quad (3)$$

Maximální vstřikovaná dávka paliva.:

$$m_{pa, celk} = \frac{P_e \cdot m_{pe}}{i_v \cdot 60 \cdot n_M} = \frac{15,5 \cdot 451}{1 \cdot 60 \cdot 3000} = 0,039 \text{ g} \quad (4)$$

Maximální doba vstřiku paliva.:

$$\tau_{vstř} = \frac{\varphi_{vstř}}{6 \cdot n_M} = \frac{60}{6 \cdot 3000} = 3,333 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (5)$$

Idealizovaná výstřiková rychlost paliva.:

$$w_{id} = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{pal}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 18,33 \cdot 10^6}{750}} = 221,088 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6)$$

Efektivní průřez otvůrků (bez uvažování ztrát).:

$$A_{ef} = \frac{m_{pa, celk}}{\rho_{pal} \cdot \tau_{vstř} \cdot w_{id}} = \frac{0,039 \cdot 10^{-3}}{750 \cdot 3,33 \cdot 10^{-3} \cdot 221,088} = 7,028 \cdot 10^{-8} \cdot \text{m}^2 \quad (7)$$

Geometrický průřez otvůrků s uvažováním ztrát při průtoku tryskou s průtokovým koeficientem $\mu_t = 0,6$:

$$A_{geom} = \frac{A_{ef}}{\mu_t} = \frac{7,028 \cdot 10^{-8}}{0,6} = 1,171 \cdot 10^{-7} \cdot m^2 \quad (8)$$

Skutečná výstřiková rychlost paliva s uvažováním ztrát při průtoku tryskou s průtokovým koeficientem $\mu_t = 0,6$. Pro kapalné palivo je to výstřiková rychlost, kterou by palivo mělo, když by průřez otvůrků trysky byl roven efektivnímu průřezu, který neuvažuje žádné ztráty:

$$w = \frac{w_{id}}{\mu_t} = \frac{221,088}{0,6} = 368,480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (9)$$

Požadovaný objemový průtok tryskou.:

$$Q_{vp} = w_{id} \cdot A_{ef} = 221,088 \cdot 7,028 \cdot 10^{-8} = 1,554 \cdot 10^{-5} \cdot m^3 \cdot s^{-1} \quad (10)$$

8.3 Názorný výpočet pro vstřikování (vefukování) plynného paliva, u kterého nelze pro prvotní výpočty zanedbat vliv stlačitelnosti.

Pro popis proudění plynů tryskami, kdy dochází při změně tlaku také ke změně hustoty, se musí postupovat jiným způsobem než při proudění kapalin. Při zvyšování výtokové rychlosti trysky dojde při určité hodnotě k tzv. aerodynamickému ucpání trysky. Tento stav se označuje jako kritický stav proudění a je definován jako stav, při kterém se právě rovná místní rychlost proudění v nejužším místě trysky rychlosti šíření zvuku v plynu při daných podmínkách.

Tento konkrétní výpočet je pro nepřímé vstřikování plynného LPG. Obdobným způsobem jsem postupoval při výpočtech nepřímého vstřikování CNG.

Měrná efektivní spotřeba paliva.:

$$m_{pe} = \frac{3600}{H_u \cdot \mu_e} = \frac{3600}{46,06 \cdot 10^6 \cdot 0,19} \cdot 10^6 =$$

$$= 411,363 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \quad (11)$$

Maximální vstřikovaná dávka paliva.:

$$m_{pa, \text{ celk}} = \frac{P_e \cdot m_{pe}}{i_v \cdot 60 \cdot n_M} = \frac{15,5 \cdot 411,36}{1 \cdot 60 \cdot 3000} = 0,035 \text{ g} \quad (12)$$

Maximální doba vstřiku paliva.:

$$\tau_{vstř} = \frac{\varphi_{vstř}}{6 \cdot n_M} = \frac{60}{6 \cdot 3000} = 2,778 \cdot 10^{-3} \text{ s} \quad (13)$$

Idealizovaná výstřiková rychlost paliva.
Rovnice Saint Vénantova - Wantzelova.:

$$w_{id} = \sqrt{\frac{2 \cdot \kappa}{\kappa - 1} \cdot r \cdot T_p \cdot \left(1 - \varepsilon^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}\right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \cdot 1,11}{1,11 - 1} \cdot 167,27 \cdot (273,15 + 15) \cdot \left(1 - 0,36^{\frac{1,11-1}{1,11}}\right)} =$$

$$= 305,79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (14)$$

Rychlost zvuku v plynném LPG (60/40) při teplotě 15 °C a tlaku 0,25 MPa (hustotě).

$$a = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}} = \sqrt{1,11 \cdot \frac{0,25 \cdot 10^6}{5,19}} = 231,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (15)$$

Skutečná výstřiková rychlost paliva bude rovna právě rychlosti zvuku, protože vyšší rychlosti nelze v této trysce dosáhnout.

$$w = a = \sqrt{\kappa \cdot \frac{p}{\rho}} = \sqrt{1,11 \cdot \frac{0,25 \cdot 10^6}{5,19}} = 231,73 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (16)$$

Efektivní průřez otvůrků (bez uvažování ztrát):

$$A_{ef} = \frac{m_{pa, celk}}{\rho_{pal} \cdot \tau_{vstř} \cdot w} = \frac{0,035 \cdot 10^{-3}}{5,19 \cdot 2,78 \cdot 10^{-3} \cdot 231,73} = 1,061 \cdot 10^{-5} \cdot \text{m}^2 \quad (17)$$

Geometrický průřez otvůrků s uvažováním ztrát při průtoku tryskou s průtokovým koeficientem $\mu_t = 0,6$:

$$A_{geom} = \frac{A_{ef}}{\mu_t} = \frac{1,061 \cdot 10^{-5}}{0,6} = 1,768 \cdot 10^{-5} \cdot \text{m}^2 \quad (18)$$

Požadovaný objemový průtok tryskou:

$$Q_{Vp} = w \cdot A_{ef} = 231,73 \cdot 1,061 \cdot 10^{-5} = 2,459 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \quad (19)$$

8.4 Tabulky s výsledky

Ostatní výpočty jsem provedl v programu Microsoft Excel a výsledky zobrazil v následujících tabulkách. Výpočtový soubor „Vypocty_vstrikovac.xlsx“ se nachází v příloze č. 1.

Varianta	Přímé vstřikování benzínu	Přímé vstřikování kapalného LPG	Nepřímé vstřikování kapalného LPG	Nepřímé vstřikování plynného LPG	Nepřímé vstřikování CNG
Potřebný tlakový spád Δp [MPa]	18,33	8,76	1,41	0,16	0,71
Měrná efektivní spotřeba paliva m_{pe} [$g \cdot kW^{-1} \cdot h^{-1}$]	451,128	411,363	411,363	411,363	555,804
Maximální vstřikovaná dávka paliva $m_{pa, celk}$ [g]	$3,885 \cdot 10^{-2}$	$3,542 \cdot 10^{-2}$	$3,542 \cdot 10^{-2}$	$3,542 \cdot 10^{-2}$	$4,786 \cdot 10^{-2}$
Maximální doba vstřiku paliva $\tau_{vstř}$ [s^{-1}]	$3,333 \cdot 10^{-3}$	$3,056 \cdot 10^{-3}$	$2,778 \cdot 10^{-3}$	$2,778 \cdot 10^{-3}$	$2,778 \cdot 10^{-3}$
Idealizovaná výstřiková rychlost paliva w_{id} [$m \cdot s^{-1}$]	221,088	180,123	72,265	305,790	713,524
Rychlost zvuku a [$m \cdot s^{-1}$]	-	-	-	231,727	442,604

Tab. 4 – Vypočtené parametry vstřikování motoru.

Varianta	Přímé vstřikování benzínu	Přímé vstřikování kapalného LPG	Nepřímé vstřikování kapalného LPG	Nepřímé vstřikování plynného LPG	Nepřímé vstřikování CNG
Skutečná výstřiková rychlost paliva w [$m \cdot s^{-1}$]	368,480	300,206	120,442	231,727	442,604
Efektivní průřez otvůrků trysky A_{ef} [m^2]	$7,028 \cdot 10^{-8}$	$1,192 \cdot 10^{-7}$	$3,268 \cdot 10^{-7}$	$1,061 \cdot 10^{-5}$	$7,268 \cdot 10^{-6}$
Geometrický průřez otvůrků trysky A_{geom} [m^2]	$1,171 \cdot 10^{-7}$	$1,986 \cdot 10^{-7}$	$5,446 \cdot 10^{-7}$	$1,768 \cdot 10^{-5}$	$1,211 \cdot 10^{-5}$
Požadovaný objemový průtok paliva tryskou Q_{vp} [$m^3 \cdot s^{-1}$]	$1,554 \cdot 10^{-5}$	$2,147 \cdot 10^{-5}$	$2,362 \cdot 10^{-5}$	$2,459 \cdot 10^{-3}$	$3,217 \cdot 10^{-3}$

Tab. 5 – Vypočtené hodnoty pro volbu vstřikovačů.

9 Výběr nejvhodnější koncepce vstřikovacího zařízení pro zadaný motor

Snahou vývoje je vytvoření motoru produkujícího nízké emise a spalujícího palivo s vysokou objemovou výhřevností, které bude na zemi dostupné po co nejdelší dobu. Tedy zemní plyn a vodík. Zemní plyn by bylo nejvhodnější vstřikovat přímo do válce v kapalně formě. Využitím LNG se dosáhne největšího dojezdu vozidla a zvýšení účinnosti díky odběru tepla ze spalovacího prostoru, které je potřebné pro odpaření LNG. Tyto technologie však nejsou dosud dokonale prozkoumané a mají před sebou ještě dlouhou vývojovou cestu. Pro odzkoušení a následnou optimalizaci motoru bych tedy volil již používané technologie.

Za nejvhodnější koncepci vstřikovacího zařízení pro zadaný motor jsem zvolil technologii přímého vstřikování LPdi systém od společnosti Vialle (kap. 6.6). Jelikož je zadaný motor dvoudobý se symetrickým rozvodem, bude nejvhodnější využívat systém s přímým vstřikováním, aby nedocházelo k úniku nespáleného paliva přímo do výfuku. Tento systém nabízí možnost provozu na benzín i LPG. Bude tedy možné ověřit funkčnost motoru s více druhy paliv. K sehnání jsou přestavbové sety pro motory TSI. Obsahují nádrž na LPG i s čerpadlem, které pomocí vestavěného kompresoru zvyšuje tlak v nádrži potřebný pro dopravu paliva až do FSU jednotky. Také obsahuje upravené vysokotlaké palivové čerpadlo, které je doplněno o regulátor tlaku paliva. Vysokotlaké palivové čerpadlo bude nutné připojit na vačkový mechanismus, který bude třeba navrhnout a umístit nejlépe na klikovou hřídel. Kromě palivového vedení bude dále třeba obstarat vysokotlaký zásobník se snímačem tlaku a vysokotlaký vstřikovač pro přímé vstřikování paliva. Pro benzínový provoz bude potřeba benzínová nádrž s palivovým čerpadlem.



Obr. 23 – Přestavbový set Vialle LPdi. [18]

Z výpočtů pro volbu vstřikovače vyšel požadovaný objemový průtok pro vstřikovač kapalného LPG $Q_{Vp} = 2,147 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} = 21,47 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro zadaný motor jsem zvolil jako vhodný vstřikovač Bosch HDEV5, který má objemový průtok při 10 MPa $Q_V = 22,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vybral jsem tento vstřikovač, protože je běžně používán například v motorech 2.0 TSI, je tudíž i cenově dostupný a je kompatibilní se systémem Vialle. Vyšší objemový průtok slouží jako rezerva v případě rozdílných parametrů reálného prototypu motoru.



Obr. 24 – Vstřikovač Bosch HDEV5. [19]

10 Závěr

Jedním z cílů této práce bylo vypracování rešerše vstřikovacích zařízení pro dodávku paliva do spalovacího motoru se zaměřením na kapalná i plynná paliva, včetně zkapalněných plynných paliv. Pro pochopení funkce různých systémů přípravy směsi a dodávky paliva je velice důležité znát vlastnosti a chování používaných paliv.

Vypracoval jsem tedy rešerši vlastností konvenčních kapalných paliv včetně alternativních plynných a zkapalněných paliv. Z této rešerše vyplynulo, že alternativní paliva jako LPG, zemní plyn a vodík jsou šetrnější k životnímu prostředí, než paliva konvenční (benzín, nafta). Z tohoto důvodu by bylo dobré směřovat vývoj k alternativním palivům, která budou oproti konvenčním zároveň i déle dostupná. Pro použití v motorech využívaných ve vozidlové dopravě je však z hlediska konkurenceschopnosti vhodné vyvíjet technologie využívající paliva s vysokou objemovou výhřevností, protože ovlivňuje dojezd vozidla. Nejvhodnější tedy bude vytvářet motory využívající LPG, LNG, či zkapalněný vodík.

V této práci jsem se dále věnoval regulaci dávky paliva, včetně výměny náplně válce a také přípravě směsi, kterou jsem nejdříve popsal obecně a následně se pak věnoval konkrétním používaným systémům. U jednotlivých systémů jsem popsal princip jejich fungování a uvedl jejich výhody a nevýhody. Ze zjištěných poznatků jsem vyhodnotil jako nejvhodnější využívat systém s přímým vstřikováním, aby nedocházelo k úniku nespáleného paliva přímo do výfuku a mimo jiné i to, že při přímém vstřiku paliva dochází k jeho odpařování přímo ve válci, čímž se uvnitř sníží teplota a lze následně zvýšit kompresní poměr. Díky využívání této technologie je pak možné dosáhnout vyšší účinnosti.

Při vytváření rešerše jsem našel systém přímého vstřikování LPdi od společnosti Vialle, který se prodává zejména pro přestavby automobilů s motory TSI z provozu využívající benzín na provoz využívající LPG. Tento systém nabízí možnost volby mezi provozem na obě tyto paliva.

Při vývoji motoru bude tedy možné využívat různá paliva včetně LPG, které je jakožto zkapalněný plyn z hlediska fyzikálních vlastností podobné LNG. Z těchto důvodů jsem tento systém zvolil jako nejvhodnější koncepci vstřikovacího zařízení pro zadaný motor.

Dalším z cílů práce byl výběr správného vstřikovače. Ten si žádal zjištění požadovaného objemového průtoku paliva tryskou. Výpočty jsem provedl pro různé typy paliv, jejichž výsledky lze následně porovnávat. Při výpočtech jsem vycházel ze zadaných parametrů a dat motoru. Po konzultaci s vedoucím jsem určil interval a dobu vstřiku paliva u jednotlivých systémů. Pro výpočet bylo nutné zjistit potřebný tlakový spád, který se počítal pomocí tlaku ve válci při kompresi a tlaku v trysce. Pro tlak v trysce jsem uvažoval hodnoty dnes používané v jednotlivých systémech a tlak při kompresi jsem bral vždy jako průměrnou hodnotu tlaku ve válci v daném intervalu vstřiku paliva.

Z výpočtů pro volbu vstřikovače vyšel požadovaný objemový průtok pro vstřikovač kapalného LPG $Q_{Vp} = 21,47 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Pro zadaný motor jsem zvolil jako vhodný vstřikovač Bosch HDEV5, který má objemový průtok při 10 MPa $Q_V = 22,5 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Vybral jsem tento vstřikovač, protože je běžně používaný například v motorech 2.0 TSI, je tudíž i cenově dostupný a je kompatibilní se systémem Vialle. Vyšší objemový průtok slouží jako rezerva v případě rozdílných parametrů reálného prototypu motoru.

Největším přínosem této práce je seznámení s vlastnostmi paliv, které bude nutné znát při dalším vývoji a také návrh koncepce vstřikovacího zařízení pro zadaný motor. Snahou vývoje je vytvoření motoru produkujícího nízké emise a spalujícího palivo s vysokou objemovou výhřevností, které bude na zemi dostupné po co nejdelší dobu. Tedy zkapalněný zemní plyn a vodík. Tyto technologie však nejsou dosud dokonale prozkoumané a mají před sebou ještě dlouhou vývojovou cestu. Pro odzkoušení a následnou optimalizaci motoru jsem tedy zvolil již používané technologie. Námětem pro další práci je vyvinutí technologie pro vstřikování kapalného zemního plynu, či vodíku.

Seznam použitých informačních zdrojů

- [1] FERENC, BOHUMIL.: Spalovací motory - Karburátory a vstřikování paliva. Computer press, 1. vydání, 2004, Praha 4, **ISBN 80-251-0207-6**. 388 s.
- [2] MACEK, JAN.: Spalovací motory I. Nakladatelství ČVUT, 1. vydání, 2007, Praha 6, **ISBN 978-80-01-03618-1**. 260 s.
- [3] BEROUN, STANISLAV.: Vozidlové motory. Technická univerzita v Liberci - fakulta strojní, katedra strojů průmyslové dopravy: Studijní texty k předmětu "Motorová vozidla", 1. vydání, 2013, Liberec, 260 s., Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1733>
- [4] JAN, ZDENĚK – BRONISLAV ŽDÁNSKÝ.: Automobily. 4, Příslušenství. Avid, 2. vydání, 2008, Brno. **ISBN 978-80-87143-08-7**. 313 s.
- [5] DUSIL, TOMÁŠ.: Mazda Skyactiv-X: Opravdu bude spalovací revoluce tak úsporná? In: Auto.cz [online]. 23.1.2018 [cit. 27.2.2018]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/mazda-skyactiv-x-opravdu-bude-spalovaci-revoluce-tak-usporna-112857>
- [6] DUSIL, TOMÁŠ.: Vstřikování dieselů včera a dnes: Proč máme common-rail a čerpadlo-tryska je mrtvé? [online]. 4. 4. 2017 [cit. 8.3.2018]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/vstrikovani-dieselu-vcera-a-dnes-proc-mame-common-rail-a-čerpadlo-tryska-je-mrtve-105083>
- [7] VLK, FRANTIŠEK.: Alternativní pohony motorových vozidel. Brno: F. Vlk, 1. vydání, 2004, Brno, **ISBN 80-239-1602-5**. 234 s.
- [8] VLK, FRANTIŠEK.: Vozidlové spalovací motory. Brno: F. Vlk, 1. vydání, 2003, Brno, **ISBN 80-238-8756-4**. 580 s.
- [9] ŠEBOR, G. – POSPÍŠIL, M. – ŽÁKOVEC, J.: Technicko – ekonomická analýza vhodných alternativních paliv v dopravě. VŠCHT v Praze, In: Biom.cz [online]. 2006 [cit. 15.3.2018]. Dostupné z: https://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/technickoekonomicka_analyza_vhodnych_alternativnich_paliv_v_doprave.pdf

- [10] GSCHEIDLE, R. A KOL.: Příručka pro automechanika. 2001, Praha, ISBN 80-85920-76-X. 629 s.
- [11] HAMZA, JAN.: Audi dokazuje výhody přímého vstřikování benzínu. In: autoperiskop.cz [online]. 31.1.2002 [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: <http://autoperiskop.cz/audi-dokazuje-vyhody-primeho-vstrikovani-benzinu/>
- [12] Lovato service & AutoGasMOTORS. In: autanaplyn.cz [online]. [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: <http://www.autanaplyn.cz>
- [13] Šest mýtů o autech na CNG. Nejsou nebezpečná a můžou jezdit i na benzín? In: novinky.cz [online]. 12.2.2018 [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: <https://www.novinky.cz/auto/463208-sest-mytu-o-autech-na-cng-nejsou-nebezpecna-a-muzou-jezdit-i-na-benzin.html>
- [14] VESELÁ SCHAUHUBEROVÁ, MARKÉTA., RWE ČESKÁ REPUBLIKA A.S.: LNG vs CNG. In: cngplus.cz [online]. [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: <http://www.cngplus.cz/lng-vs-cng.html>
- [15] Bosch natural-gas injector. In: bosch-mobility-solutions.com [online]. [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/commercial-vehicles/powertrain-systems/natural-gas/natural-gas-injector/>
- [16] Alternative Fuels Data Center. How Do Liquefied Natural Gas Trucks Work? In: afdc.energy.gov [online]. [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: <https://www.afdc.energy.gov/vehicles/how-do-lng-cars-work>
- [17] Gas density calculator. In: easy-unit.de [online]. [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: <http://easy-unit.de/converter/gasdensity.php?lang=ENG&class=19>
- [18] Liquid Propane Direct Injection. In: vialle.nl [online]. [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: <https://www.vialle.nl/en/products/lpdi>
- [19] Direct injection Bosch. In: bosch.co.jp [online]. [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: http://www.bosch.co.jp/tms2015/en/products/pdf/Bosch_di_folder.pdf
- [20] E-tabulky. Tepelná kapacita plynů. In: vscht.cz [online]. [cit. 9.5.2018]. Dostupné z: https://vscht.cz/uchi/e_tabulky/cpplyn.html

[21] Premium Fuel Injectors Bosch. In: boschautoparts.com [online]. [cit. 9.5.2018].
Dostupné z: <https://www.boschautoparts.com/documents/101512/0/0/dd11b67e-8e9d-418e-ad7c-e57a1640bfd3>

11 Seznam příloh

Příloha 1 – Výpočtový soubor pro výpočet vstříkovačů programu Microsoft Excel
„Vypocty_vstrikovacu.xlsx“

12 Seznam obrázků

OBR. 1 - ODHAD MAXIMÁLNÍCH SVĚTOVÝCH ZÁSOB ROPY A ZEMNÍHO PLYNU. [7]	14
OBR. 2 - UKÁZKY NÁDRŽÍ NA LPG (TOROIDNÍ - NAHOŘE, VÁLCOVÁ - DOLE). [12]	16
OBR. 3 - ZÁVISLOST TLAKU V NÁDRŽI NA SLOŽENÍ A TEPLITĚ LPG. [9].....	17
OBR. 4 - POHLED NA ZADNÍ ČÁST VOZU ŠKODA OCTAVIA G-TEC A NA JEHO DVĚ OCELOVÉ TLAKOVÉ NÁDRŽE, KTERÉ DOHROMADY POJMU AŽ 15 KG CNG. [13].....	21
OBR. 5 - KRYOGENNÍ NÁDRŽ NA LNG UMÍSTĚNÁ NA TAHAČI POUŽÍVANÉHO V USA. [14].....	22
OBR. 6 - ZÁVISLOST KONCENTRACE PLYNNÝCH ŠKODLIVIN VE VÝFUKOVÝCH PLYNECH NA BOHATOSTI SMĚSI. [3].....	33
OBR. 7 - ZÁKLADNÍ PRINCIP ČINNOSTI KARBURÁTORU. [9].....	36
OBR. 8 - ELEKTROMAGNETICKY OVLÁDANÝ VSTŘIKOVACÍ VENTIL PRO NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ BENZÍNU („TOP – FEED“). [9]	37
OBR. 9 - NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ JEDNOBODOVÉ – SPI. [9]	38
OBR. 10 - NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ VÍCEBODOVÉ – MPI. [9]	39
OBR. 11 - BLOKOVÉ SCHÉMA VSTŘIKOVACÍ SOUSTAVY S ELEKTRONICKOU REGULACÍ. [9].....	40
OBR. 12 - SCHÉMA SNÍMÁNÍ PARAMETRŮ A ŘÍZENÍ VSTŘIKOVÁNÍ BENZINU A ZAPALOVÁNÍ BOSCH MOTRONIC. [9]	41
OBR. 13 – ŘEZ VYSOKOTLAKÝM VSTŘIKOVACÍM VENTILEM PRO PŘÍMÝ VSTŘIK BENZÍNU OD VÝROBCE BOSCH. [21].....	42
OBR. 14 - SCHÉMA PŘÍMÉHO VSTŘIKOVÁNÍ BENZINU, SYSTÉM GDI. [9].....	43
OBR. 15 - ČINNOST KLAPEK V SACÍM POTRUBÍ PŘI PLNĚNÍ VÁLCE V ÚSPORNÉM REŽIMU FSI. [11]	44
OBR. 16 - ČINNOST SYSTÉMU GDI VE VÝKONNOSTNÍM A ÚSPORNÉM REŽIMU. [9].....	45
OBR. 17 - SCHÉMA PLYNOVÉ ZÁSTAVBY S VÍCEBODOVÝM SEKVENČNÍM VSTŘIKOVÁNÍM LPG. [9].....	48
OBR. 18 – SCHÉMA LPDI SYSTÉMU OD SPOLEČNOSTI VIALLE. [18]	50
OBR. 19 - VSTŘIKOVAČ ZEMNÍHO PLYNU BOSCH NGI2. [15].....	52
OBR.20 - SCHÉMA MOTORU NA ZEMNÍ PLYN SE SYSTÉMEM BOSCH. [15]	53
OBR. 21 - UKÁZKA TAHAČE NA LNG, KTERÝ SE POUŽÍVÁ V USA. [16]	54
OBR. 22 – GRAF ZÍSKANÝ Z DAT VIRTUÁLNÍHO MODELU MOTORU S VYZNAČENÝM INTERVALEM VSTŘIKU PALIV.	58
OBR. 23 – PŘESTAVBOVÝ SET VIALLE LPDI. [18].....	68
OBR. 24 – VSTŘIKOVAČ BOSCH HDEV5. [19].....	68

13 Seznam tabulek

TAB. 1 - VYBRANÉ FYZIKÁLNĚ-CHEMICKÉ VLASTNOSTI PALIV PRO SPALOVACÍ MOTORY. [9]..	28
TAB. 2 - TEORETICKY IDEÁLNÍ STECHIOMETRICKÉ MNOŽSTVÍ SUCHÉHO VZDUCHU VE SMĚSI PRO RŮZNÁ PALIVA.....	32
TAB. 3 – ZVOLENÉ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ.....	57
TAB. 4 – VYPOČTENÉ PARAMETRY VSTŘIKOVÁNÍ MOTORU.	65
TAB. 5 – VYPOČTENÉ HODNOTY PRO VOLBU VSTŘIKOVAČŮ.....	66

14 Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotky	Název
a	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$	Rychlost zvuku
A_{geom}	$[\text{m}^2]$	Geometrický průřez otvorů trysky
c_p	$[\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$	Tepelná kapacita při stálém tlaku plynu
H_u	$[\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}]$	Dolní výhřevnost paliva
L_t	$[\text{kg}/\text{kg}]$	Teoreticky ideální stechiometrické množství suchého vzduchu ve směsi
m_L	$[\text{kg}]$	Hmotnost suchého vzduchu ve směsi
M_m	$[\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}]$	Molekulová hmotnost plynu
m_p	$[\text{kg}]$	Hmotnost paliva ve směsi
$m_{\text{pa, celk}}$	$[\text{g}]$	Maximální vstříkovaná dávka paliva
m_{pe}	$[\text{g}\cdot\text{kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}]$	Měrná efektivní spotřeba paliva
n_m	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky motoru
P_e	$[\text{kW}]$	Výkon motoru
p_k	$[\text{MPa}]$	Kompresní tlak
$p_{k\text{ben}}$	$[\text{MPa}]$	Průměrná hodnota kompresního tlaku u přímého vstříkovaní benzínu
$p_{k\text{CNG}}$	$[\text{MPa}]$	Průměrná hodnota kompresního tlaku u nepřímého vstříkovaní plynného CNG
$p_{k\text{LPdi}}$	$[\text{MPa}]$	Průměrná hodnota kompresního tlaku u přímého vstříkovaní kapalného LPG

Označení	Jednotky	Název
p_{kLPG}	[MPa]	Průměrná hodnota kompresního tlaku u nepřímého vstřikování plynného LPG
p_{kLPi}	[MPa]	Průměrná hodnota kompresního tlaku u nepřímého vstřikování kapalného LPG
p_{kmax}	[MPa]	Maximální kompresní tlak ve válci
p_t	[MPa]	Tlak v trysce
p_{tben}	[MPa]	Tlak v trysce u přímého vstřikování benzínu
p_{tCNG}	[MPa]	Tlak v trysce u nepřímého vstřikování plynného CNG
p_{tLPdi}	[MPa]	Tlak v trysce u přímého vstřikování kapalného LPG
p_{tLPG}	[MPa]	Tlak v trysce u nepřímého vstřikování plynného LPG
p_{tLPi}	[MPa]	Tlak v trysce u nepřímého vstřikování kapalného LPG
Q_V	[m ³ ·s ⁻¹]	Objemový průtok paliva tryskou
Q_{Vp}	[m ³ ·s ⁻¹]	Požadovaný objemový průtok paliva tryskou
r	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná plynová konstanta
T_p	[°C]	Teplota paliva
Δp	[MPa]	Potřebný tlakový spád
ε	[1]	Tlakový poměr
η_e	[%]	Efektivní účinnost motoru
κ	[1]	Poissonova plynová konstanta
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
μ_t	[-]	Průtokový koeficient trysky

Označení	Jednotky	Název
ρ_{pal}	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$	Hustota paliva
$\tau_{\text{vstř}}$	[g]	Maximální doba vstřiku paliva
$\varphi_{\text{vstř}}$	[°]	Úhel vstřiku