



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

MOTORY DIESELGAS

DIESELGAS ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Březina

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Tomáš Březina**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Motory Dieselgas

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dlouhodobě probíhá vývoj spalovacích motorů pro nákladní a osobní hromadnou dopravu, které místo nafty využívají plynná paliva a to zejména CNG. Většinou se tyto přestavby provádí změnou motoru ze vznětového na zážehový. V poslední době je zde snaha toto řešit mícháním plynného paliva s naftou a toto palivo použít ve vznětovém motoru.

Cíle bakalářské práce:

Přehled možností používat plynných paliv ve vznětových motorech, a to jak přestavbou na zážehový motor, tak i bez této změny. Přehled plynných paliv vhodných pro nákladní a osobní hromadnou dopravu. Možnosti kombinování nafty s plynnými palivy, technologie úprav. Vliv těchto úprav na spotřebu paliva a vznik emisí. Provést diskusi nad získanými poznatky.

Seznam doporučené literatury:

BIERNAT, K. Alternative Fuels Technical and Environmental Conditions. 1. ExLi4EvA, 2016. ISBN 978-953-51-2269-2.

KIRKPATRICK, A. T. a FERGUSON, Colin R. Internal combustion engines: applied thermosciences. Third. United Kingdom: John Wiley, 2016. ISBN 978-1-118-53331-4.

MACEK, J. Spalovací motory. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80--1-05015-6.

MATĚJOVSKÝ, V. Automobilová paliva. Praha: Grada, 2005. ISBN 80-247-0350-5.

STONE, R. Introduction to internal combustion engines. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, c2012. ISBN 978-0-230-57663-6.

ZHAO, H., ed. HCCI and CAI engines for automotive industry. 1. New York: CRC Press, 2007. ISBN 978-1-4200-4459-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tématem motory Dieselgas. První část práce je zaměřena na historii a vývoj motorů a motorových paliv. Druhá část práce se zabývá vznětovými motory, popisem pracovního cyklu motoru, systémem vstřikování paliva, typy motorových naft, účinností motoru a jeho emisemi. V následující kapitole je zpracován přehled plynných paliv vhodných pro osobní a hromadnou dopravu. Z těchto paliv jsou dále rozvedené dvě nejčastěji využívané. Čtvrtá kapitola pojednává o využití plynných paliv ve vznětových motorech, možnosti přestavby těchto motorů, a to jak přestavbou na zážehový, tak i bez této změny. V poslední kapitole je zpracován vliv na spotřebu a vznik emisí u motorů s duálním pohonem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vznětový motor, plynné palivo, Dieselgas, duální pohon, LPG, CNG

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the topic of Dieselgas engines. The first part work is focused on the history and development of engines and motor fuels. The second part deals with diesel engines, a description of the engine operating cycle, fuel injection system, types of diesel fuel, engine efficiency and emissions. The following chapter provides an overview of gaseous fuels suitable for passenger and public transport. Of these fuels, the two most commonly used are further elaborated. The fourth chapter deals with the use of gaseous fuels in diesel engines, the possibility of conversion of these engines, both by conversion to petrol and without this change. The last chapter deals with the effect on consumption and emissions of dual fuel engines.

KEYWORDS

Diesel engine, gaseous fuel, Dieselgas, dual fuel, LPG, CNG

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BŘEZINA, Tomáš. *Motory Dieselgas* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132513>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 51 s. Vedoucí práce Josef Štětina.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 21. května 2021

.....

Tomáš Březina

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky v průběhu zpracování této práce.

OBSAH

Úvod	10
1 Historie vývoje motorů a paliv	11
2 Vznětové motory	13
2.1 Pracovní cyklus	13
2.2 Vstřikování paliva	14
2.2.1 Systém common-rail	14
2.3 Motorová nafta	15
2.4 Účinnost	16
2.5 Emise	19
2.5.1 Oxid uhelnatý CO	19
2.5.2 Nespálené uhlovodíky HC	20
2.5.3 Oxidy dusíku NO _x	20
2.5.4 Pevné částice PM	21
3 Plynná paliva	22
3.1 Přehled plynných paliv	23
3.2 LPG	23
3.3 CNG	25
4 Využití plynných paliv ve vznětových motorech	28
4.1 Přestavba na zážehový motor	28
4.2 Přestavba na duální pohon (Dieselgas)	29
4.2.1 Dieselgas LPG	30
4.2.2 Dieselgas CNG	34
5 Vliv na spotřebu a vznik emisí	38
5.1 Dieselgas LPG	38
5.2 Dieselgas CNG	41
Závěr	43
Seznam použitých zkratk a symbolů	50

ÚVOD

I když jsou v poslední době vznětové motory na ústupu z důvodu přísnějších emisních limitů, stále patří mezi nejvyužívanější motory v nákladní a osobní hromadné dopravě, a to díky jejich ekonomičnosti provozu. V posledních letech je však stále vyvíjen větší tlak na dodržování emisních norem, a to zejména u těchto motorů. Kvůli těmto restrikcím se v současnosti opět do popředí dostávají plynná paliva. Tato paliva bývají využívána zejména u zážehových motorů, ale jejich uplatnění se najde i u motorů vznětových. U vznětových motorů však nelze plyn využít jako samostatné palivo, ale vždy musí být kombinován s motorovou naftou.

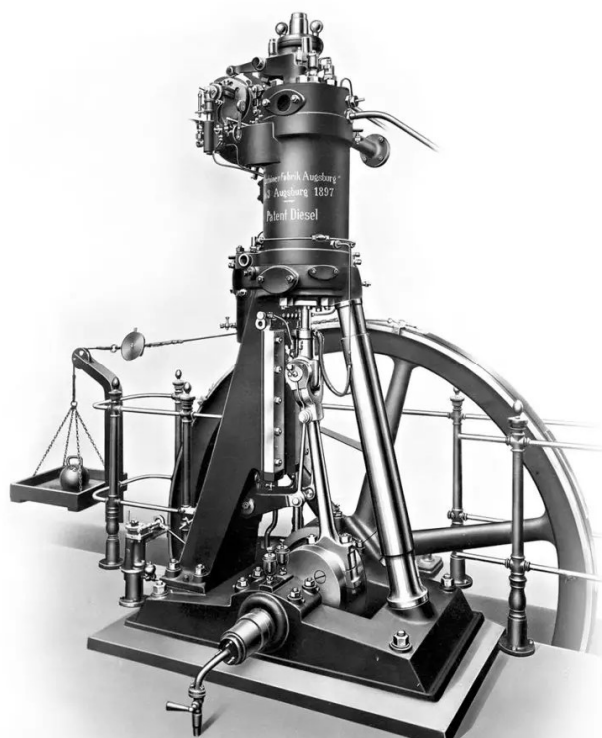
Plyn jako jedno z paliv vznětového motoru se používá již několik let. Ve světě je tato technologie využívána například v Severní Americe, Austrálii nebo Kanadě a je známá pod názvem Dieselgas. Do Evropy se tato technologie dostala až v posledních letech, a to zejména z důvodu zvyšování cen pohonných hmot. Tento způsob pohonu se postupně rozšiřuje i u nás v České republice. Postupně na našem území přibývá zájemců o tuto zástavbu, které láká ekologie a zejména ekonomika provozu těchto vozů. S přibývajícím zájemci přibývá i firem, které tuto přestavbu vznětových motorů na systém Dieselgas nabízejí.

Tato práce se bude zabývat motory Dieselgas. Bude zde uveden přehled plynných paliv a dále rozvedena dvě nejčastěji využívaná plynná paliva, která jsou vhodná pro nákladní a osobní hromadnou dopravu. Práce bude dále obsahovat možnosti využití plynných paliv ve vznětových motorech, jaké úpravy se využívají, vliv těchto úprav na chod motoru a jeho výkonovou charakteristiku. Také zde bude uvedeno, jaké mají tyto úpravy vliv na ekonomičnost provozu daného vozu a vliv na produkci škodlivých látek. Čtenář by měl přečtením této práce získat přehled o tom, jak se úpravy vznětových motorů realizují, jaká plynná paliva se u těchto úprav využívají, jak systém Dieselgas funguje a jeho vliv na ekonomii a ekologii provozu.

1 HISTORIE VÝVOJE MOTORŮ A PALIV

První zmínka o motoru pochází již z roku 1688, kdy francouzský fyzik Denis Papin (1647-1712) sestrojil svůj ohňový atmosférický stroj [1]. Tento stroj však překvapivě nevyužíval expanzivní sílu exploze k pohánění pístů ve válci. Místo toho se ve válci nechalo explodovat malé množství střelného prachu, který svou explozí rozpochoval píst. Píst poté vytlačil vzduch, který konal práci. Papin brzy zjistil, že mnohem efektivnější bude ve válci použít páru k expanzi. Tento koncept převzal kovář Thomas Newcomen (1663-1729), který na začátku 18. století sestrojil svůj první atmosférický parní motor. Následný vývoj atmosférických parních strojů a pozdějších vysokotlakých parních strojů zastínil vývoj spalovacích motorů téměř na dvě století. Na konci 18. a počátku 19. století se objevuje nespočet návrhů a patentů spalovacích motorů [2]. V roce 1858 vyvíjí belgický inženýr Étienne Lenoir (1822-1900) dvoutaktní motor o výkonu 6-ti koňských sil a účinnosti okolo 5 %. Tento motor byl primárně využíván ve stacionárních energetických aplikacích. V roce 1872 George Brayton (1830-1892), americký strojní inženýr, patentuje svůj spalovací motor s konstantním tlakem. Braytonův pístový motor byl použit na prvním automobilu v roce 1878 [3].

Průlom přichází roku 1876. V tomto roce německý inženýr Nikolaus Otto (1832-1891) představuje světu první praktický čtyřtaktní spalovací motor s kompresí ve válcích. Motor o kompresním poměru 2,5 a výkonu 2 koňských sil při 160 otáčkách za minutu dosahoval účinnosti 14 %. Nikolaus Otto je považován za vynálezce moderního spalovacího motoru a zakladatele průmyslu spalovacích motorů. O pár let později, roku 1897, vyvinul Rudolf Diesel (1858-1913) první praktický čtyřtaktní motor (obr. 1) využívající přímé vstřikování kapalného paliva do spalovací komory. Vysoký kompresní poměr motoru vedl k samovznícení a spalování směsi vzduchu a paliva. Při plném zatížení motor dosahoval účinnosti 27 %, což ve své době značně předčilo všechny používané parní a zážehové motory [3].



Obr. 1 První funkční stabilní motor Diesel z roku 1897 [4]

Více než 100 let, souběžně s vývojem spalovacích motorů, probíhá vývoj paliv rukou palivářských chemiků. V posledních letech je tento vývoj plně podřízen ekologickým požadavkům [5]. Už první vozidla na světě byla poháněna plynem. K jejich pohonu bylo využito směsi vzduchu a svítiplynu. Krátce poté se k pohonu motorů začínají využívat i kapalné pohonné hmoty – petrolej, později benzín a nafta. Tyto paliva se nakonec staly rozhodujícími v automobilovém průmyslu na konci 19. a zejména v 20. století. O návrat plyných paliv se však v první polovině 20. století postaral nedostatek kapalných pohonných hmot za první i druhé světové války [6]. U benzinů byla v průběhu let upravována zejména těkavost. Od konce sedmdesátých let začíná být vyvíjen ekologický tlak na kvalitu benzínu. Stejně tak je tomu i u motorové nafty, u které je požadavek zejména na snížení obsahu síry, s cílem snížení emisí oxidů síry a potlačení kouřivosti motorů. Motorové palivo LPG se poprvé objevuje ve větší míře ve třicátých letech v Německu z důvodu deficitní bilance benzínu. Toto palivo se rozšířilo díky nově zavedeným hydrogenačním procesům. Další rozšíření nastává po válce v polovině padesátých let, kdy opět začíná fungovat německý chemický průmysl a tato technologie se rozšiřuje i do ostatních zemí. Koncem 20. století dochází v Evropě ke sjednocení kvality a norem paliv [5].

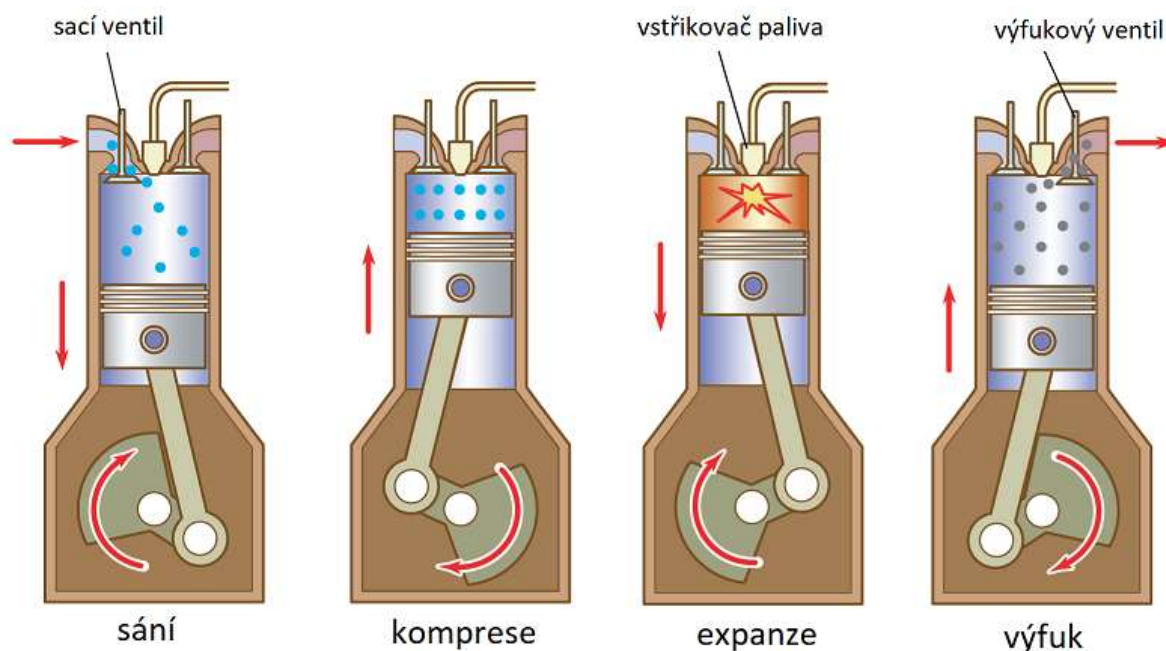
2 VZNĚTOVÉ MOTORY

Vznětový motor je jakýkoli spalovací motor, ve kterém je vzduch stlačován na dostatečně vysokou teplotu, aby dokázal zapálit motorovou naftu vstříkovanou do válce. Přeměňuje chemickou energii uloženou v palivu na energii mechanickou, kterou lze použít k pohonu nákladních vozů, velkých traktorů, lokomotiv a námořních plavidel. Omezený počet automobilů má také naftový pohon [7]. V druhém čtvrtletí roku 2020 klesl v Evropě prodej aut se vznětovým motorem pod 30 %. Tento pokles je zapříčiněn zejména emisními limity [8].

2.1 PRACOVNÍ CYKLUS

Vznětový motor je zařízení, které pracuje s přerušovaným spalováním ve válcích. Pracuje buď s dvoutaktním, nebo čtyřtákním cyklem (obr. 2). Na rozdíl od zážehového motoru se při sání do spalovací komory nasává jen vzduch. Naftové motory jsou obvykle konstruovány s kompresními poměry 14 : 1 až 22 : 1 [7].

Tyto motory získávají energii spalováním paliva vstříkovaného do stlačeného vzduchu uvnitř válce. Vzduch ve válci musí dosáhnout vyšší teploty, než je teplota, při které se vstříkované palivo může vznítit [7]. Do válce se nejdříve nasaje vzduch. Po uzavření sacího ventilu se nasátý vzduch pístem stlačí. Kompresí se jeho teplota zvýší na více než 500 °C v závislosti na kompresním poměru. Těsně předtím, než se píst při stlačování vzduchu dostane do horní úvrati, je vstříknuta do spalovacího prostoru motorová nafta. Ta se v ohřátém vzduchu samovznítí. Při expanzi této směsi se na klikové hřídeli koná práce [9].



Obr. 2 Pracovní cyklus čtyřdobého vznětového motoru (upraveno) [7]

2.2 VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA

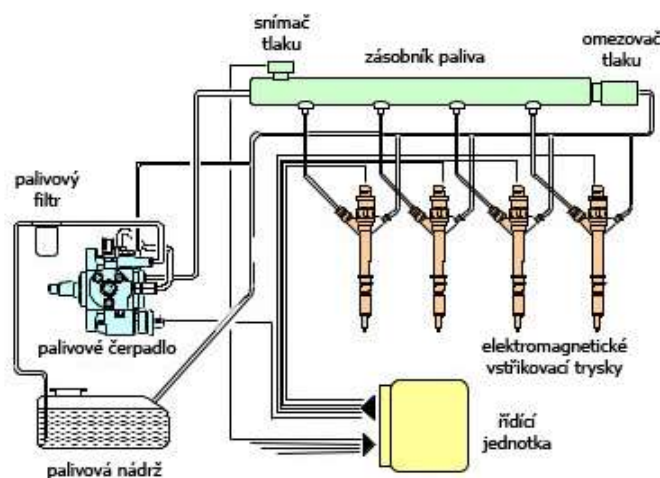
Vstřikovací systémy vznětových motorů jsou konstruovány tak, aby dosahovaly co nejvyšších vstřikovacích tlaků. Přesná kontrola vstřikování je klíčová pro výsledný výkon motoru. Jelikož celý proces spalování je řízen právě vstřikováním paliva, vstřikování musí začínat ve správné poloze pístu. Nejdříve se palivo spaluje téměř s konstantním objemem, zatímco se píst nachází v horní úvrati. Když poté píst pokračuje v pohybu z této polohy, pokračuje se ve vstřikování paliva a tento technologický proces se jeví jako proces s téměř konstantním tlakem [7].

2.2.1 SYSTÉM COMMON-RAIL

Common-rail je v dnešní době nejrozšířenějším způsobem vstřikování paliva u vznětových motorů. Palivo je do válce vstřikováno pod vysokým tlakem, což zajišťuje vytvoření lepší směsi pro hoření. Tato směs zvyšuje účinnost motoru, a s tím spjatý výkon a kroutící moment. V neposlední řadě systém common-rail dosahuje nižší spotřeby paliva [10].

Systém se skládá z vysokotlakého čerpadla, vstřikovačů, kolejnice a elektronické řídicí jednotky (obr. 3). Hlavní rozdíl mezi přímým vstřikováním common-rail a standardním vstřikováním je dodávání paliva a způsob, jakým se palivo míchá s přiváděným vzduchem. Palivo je vstřikováno přímo do spalovací komory, čímž se neztrácí žádný čas v sacím potrubí jako u standardního vstřikování. Vstřik je řízen elektronickou jednotkou a je aplikován do místa spalovací komory s nejvyšší teplotou, díky čemuž hoření probíhá rovnoměrněji [11].

U konvenčních vznětových motorů se vstřikovací tlak generuje pro každý vstřikovač zvlášť. Motor s přímým vstřikováním, založený na principu common-rail, odděluje dvě funkce – generování tlaku a vstřikování. Nejdříve se palivo pod vysokým tlakem skladuje v centrální nádobě a poté je dodáváno jednotlivým vstřikovacím ventilům pouze na příkaz řídicí jednotky. Díky tomuto je neustále k dispozici vstřikovací tlak až 1 500 barů, a to i při nízkých otáčkách motoru. Vysoký tlak zajišťuje velmi jemné rozprašování paliva, což vede k lepšímu a čistšímu spalování. Dodávka paliva navíc nezáleží na otáčkách motoru, ale lze ji optimalizovat samostatně. Čas a doba vstřikování nejsou pevné (jako u starších konvenčních motorů), ale lze je zvolit nezávisle pro každý provozní bod, aby se optimalizovalo spalování a tvorba emisí [12].



Obr. 3 Schéma systému Common-rail [13]

2.3 MOTOROVÁ NAFTA

Motorová nafta, v zahraničí známá jako diesel, je směs uhlovodíků s bodem varu v rozmezí 150 až 380 °C, které se získávají z ropy. Ropné oleje se skládají z uhlovodíků tří hlavních tříd: parafinické, naftenové (nebo cykloparafinické) a aromatické [14].

Zásadní fyzikálně-chemickou nevýhodou nafty je její teplota tuhnutí [15]. Kvalitní motorová nafta totiž musí obsahovat delší řetězce nerozvětvených uhlovodíků, mezi něž patří parafinické uhlovodíky. Tyto uhlovodíky při nízkých teplotách produkují krystaly, které způsobují zatuhnutí nafty [16].

Z tohoto důvodu se v různých ročních obdobích produkují různé typy nafty. V létě se vyrábí nafta, u níž není kladen velký důraz na její nízkoteplotní vlastnosti. Naopak od poloviny listopadu až do konce února je produkována zimní motorová nafta. Tato nafta musí splňovat dané normy, zejména aby nevytěšňovala parafinické látky [16].

V následující tabulce je uvedeno rozdělení motorových naft společně s obdobím, kdy jsou na čerpacích stanicích dostupné a jejich filtrovatelnost. Filtrovatelnost nám udává teplotní bod, kdy dochází k ucpávání sítka vstřikovacího čerpadla a palivového filtru. Toto ucpávání zapříčiňují už výše zmiňované krystalky parafinů [17].

Tab. 1 Přehled tříd motorových naft [15]

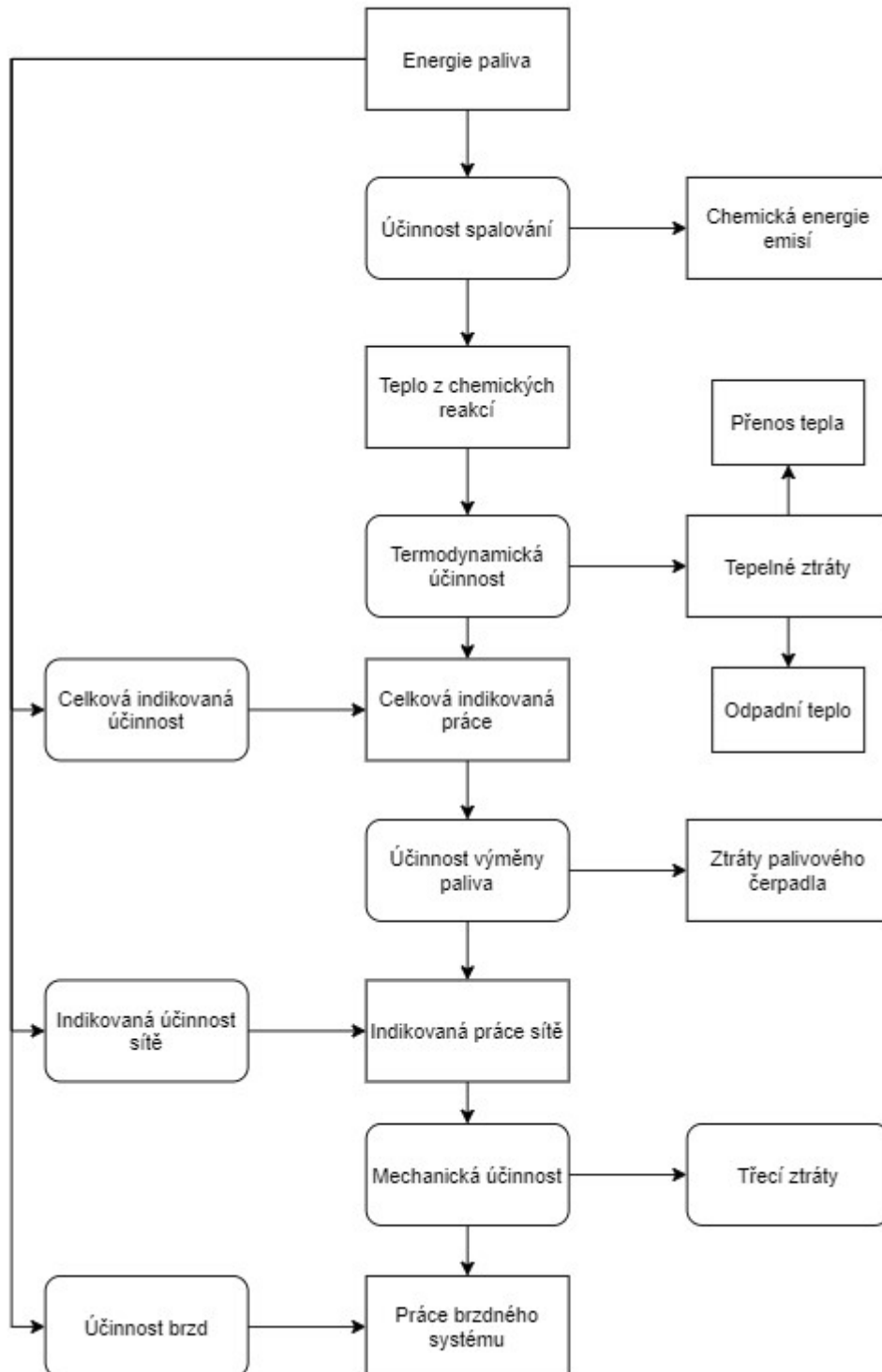
Název (třída)	Letní motorová nafta (B)	Přechodová motorová nafta (D)	Zimní motorová nafta (F)	Arktická motorová nafta
Období	15.04. – 30.09.	1.3. – 14.4. a 1.10. – 15.11.	16.11. – 28.02.	Specificky na určitých místech během zimy
Filtrovatelnost	<0 °C	< -10 °C	< -20 °C	< -32 °C

Mimo letní a zimní nafty se můžeme taktéž setkat s přechodovou motorovou naftou. Tato nafta se distribuuje na všech stanicích v přechodovém období mezi letní a zimní naftou. Na vybraných místech České republiky se v zimním období můžeme setkat s arktickou motorovou zimní naftou, která má zvýšenou filtrovatelnost až do -32 °C. Odhad spotřeby této nafty je celoročně jen okolo 2–5 % [17].

Kvalita nafty je u nás řízena normou ČSN EN 590 a její kvalitu, co se týče vznětové charakteristiky, udává tzv. cetanové číslo. Tato norma udává požadavky a metody zkoušení motorových naft. Také vymezuje informace k odběru vzorků, požadavky na označování výdejních stojanů a požadavky závislé na klimatických podmínkách. Norma se vztahuje na motorové nafty, které jsou určeny pro pohon motorových vozidel se vznětovým motorem [18].

2.4 ÚČINNOST

Přeměna energie z paliva na mechanickou energii zahrnuje řadu ztrát. Hlavní ztráty energie motoru a faktory ovlivňující účinnost jsou zobrazeny na následujícím obrázku [19].



Obr. 4 Přehled energetických ztrát spalovacího motoru (upraveno) [19]

Naftové motory jsou úspornější a dosahují vyšších kroutících momentů než benzínové motory podobné velikosti. Samotná motorová nafta obsahuje o zhruba 10 až 15 % více energie než benzín. Vozidla se vznětovým motorem tedy značně vynikají svou spotřebou paliva [20].

Stlačováním vzduchu, namísto směsi vzduch-palivo, není naftový motor omezen problémy s předčasným vzplanutím, které trápí zážehové motory s vysokou kompresí. U vznětových motorů lze proto dosáhnout vyšších kompresních poměrů než u jejich protějšků se zážehovým motorem, díky čemuž dosahují i vyšší účinnosti teoretického cyklu. Je potřeba dodat, že pro daný kompresní poměr je teoretická účinnost zážehového motoru vyšší než u vznětového, avšak v praxi se takto vysokých kompresních poměrů daří dosáhnout jen u vznětových motorů. Naftové motory se navíc při řízení výkonu nespolehají na škrcení směsi sání, proto je volnoběh a účinnost při sníženém výkonu značně lepší [7].

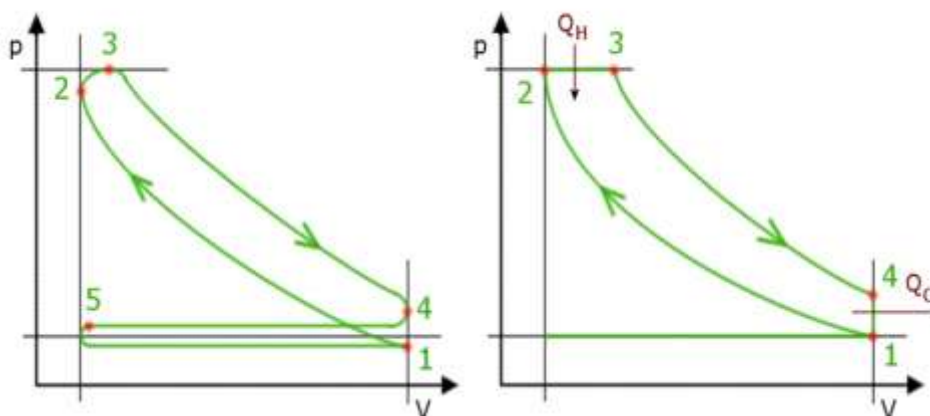
V následující tabulce je uvedena průměrná tepelná (termodynamická) účinnost dle typu motoru. Tyto údaje ukazují až 30% nárůst tepelné účinnosti vznětového motoru nad zážehovým [21].

Tab. 2 Průměrná tepelná účinnost zážehových a vznětových motorů [21]

Typ motoru	Tepelná účinnost
Čtyřdobý zážehový motor	30 %
Dvoudobý zážehový motor	22 %
Čtyřdobý vznětový motor	40,3 %
Dvoudobý vznětový motor	43 %

Termická účinnost Dieselova cyklu (obr. 5) je funkcí přivedeného a odvedeného tepla [22]:

$$\eta_t = 1 - \frac{|Q_C|}{Q_H} = 1 - \frac{m \cdot c_v \cdot (T_4 - T_1)}{m \cdot c_p \cdot (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{m \cdot (T_4 - T_1)}{m \cdot \kappa \cdot (T_3 - T_2)} \quad (1)$$

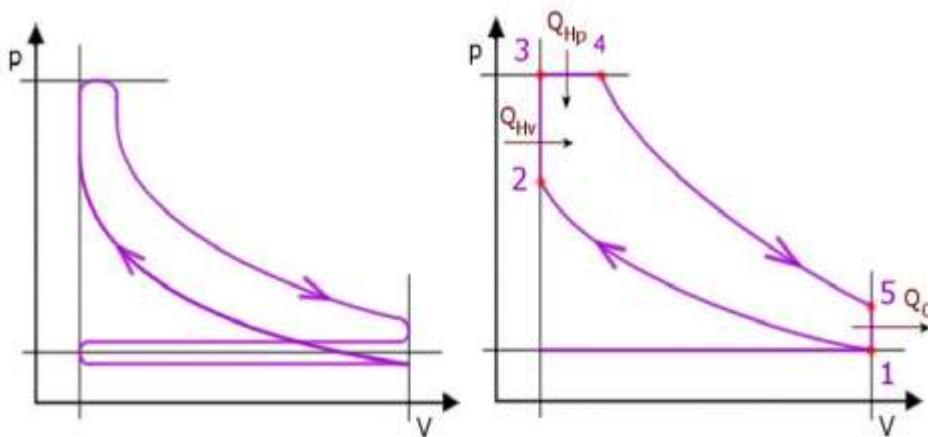


Obr. 5 p-V diagram skutečného a teoretického Dieselova cyklu [23]

Teoretický Dieselův cyklus se skládá z těchto dějů [22]:

- 1-2 komprese atmosférického vzduchu – adiabata
- 2-3 izobarický přívod tepla – hoření paliva
- 3-4 adiabatická expanze zplodin hoření
- 4-1 výfuk zplodin – izochorický odvod tepla

U teoretického Diesela cyklu probíhá spalování paliva při konstantním tlaku. Robert Diesel využil ke vstřikování paliva do válce stlačeného vzduchu [24]. Moderní vznětové motory však využívají ke vstřikování vysokotlaká čerpadla. Při takto rychlém vstříknutí paliva se spalovací proces odehrává nejdříve téměř s konstantním objemem a poté s téměř konstantním tlakem [22], jak již bylo řečeno v podkapitole vstřikování paliva. Tento modernizovaný Dieselův cyklus dostal název smíšený či kombinovaný cyklus [24]. Taktéž bývá nazýván Sabatův cyklus (obr. 6) podle francouzského konstruktéra, který roku 1909 zkonstruoval motor pracující na tomto principu [22].



Obr. 6 p-V diagram skutečného a teoretického Sabatova cyklu [23]

Teoretický Sabatův cyklus se skládá z těchto dějů [22, 24]:

- 1-2 komprese atmosférického vzduchu – adiabata
- 2-3 izochorický přívod tepla
- 3-4 izobarický přívod tepla
- 4-5 adiabatická expanze zplodin hoření
- 5-1 výfuk zplodin – izochorický odvod tepla

Termická účinnost Sabatova cyklu lze poté zapsat takto [22]:

$$\eta_t = 1 - \frac{|Q_c|}{Q_{Hv} + Q_{Hp}} = 1 - \frac{m \cdot c_v \cdot (T_5 - T_1)}{m \cdot c_v \cdot (T_3 - T_2) + m \cdot c_p \cdot (T_4 - T_3)} \quad (2)$$

Při použití následující substituce [22]:

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{p_3}{p_2} \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{V_4}{V_3} \quad (5)$$

Můžeme výsledný vzorec pro termickou účinnost Sabatova cyklus zapsat jako [22]:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} = \frac{\psi \cdot \varphi^{\kappa-1}}{\kappa \cdot \psi \cdot \varphi + \psi \cdot (1-\kappa) - 1} \quad (6)$$

Účinnost tohoto cyklu, stejně jako účinnost Dieselova cyklu, roste se stoupajícím stupněm komprese. Účinnost nám také vzroste při snížení stupně plnění φ , popřípadě zvýšením kompresního a maximálního tlaku [24].

2.5 EMISE

Naftové motory nejvíce přispívají ke znečištění životního prostředí svými výfukovými plyny a také jsou zodpovědné za velké množství zdravotních problémů. V posledních letech bylo zavedeno po celém světě mnoho opatření ke snížení negativních účinků vznětových motorů na lidské zdraví a životní prostředí. Na téma emisí a technologií pro jejich regulaci bylo provedeno nespočet výzkumů [25].

Hlavní činností vznětového motoru je spalování směsi paliva a vzduchu. Toto spalování probíhá na základě oxidace hořlavých složek paliva společně s kyslíkem obsaženým ve vzduchu a palivem, které ve spalovacím prostoru rychle mění svou teplotu a tlak. Při procesu hoření mezi sebou jednotlivé složky reagují při vysokých teplotách a tlacích, čímž uvolňují tepelnou a tlakovou energii. Při těchto procesech zároveň probíhají reakce prvků ve vzduchu. V důsledku těchto reakcí vznikají složky ve všech skupenstvích, které vystupují ze spalovacího prostoru. Některé složky nevznikají ve spalovací komoře, ale až při průchodu výfukovým potrubím. Na vznik emisí má největší podíl průběh spalování. Průběh spalování je ovlivněn zejména tepelnými, tvarovými a vírovými vlastnostmi spalovacího prostoru, také způsobem a kvalitou vstřikování paliva. Podle doposud vykonaných výzkumů se ve výfukových plynech vznětových spalovacích motorů nachází okolo 160 jednotlivých složek [26].

Mezi čtyři hlavní znečišťující látky se řadí oxid uhelnatý CO, nespálené uhlovodíky HC, oxidy dusíku NO_x a pevné částice PM [25, 26].

2.5.1 OXID UHELNATÝ CO

Jedná se o bezbarvý, hořlavý plyn bez chuti a zápachu [27]. Oxid uhelnatý vzniká nedokonalým spalováním, při kterém oxidační proces neproběhne úplně [25]. Nedokonalé spalování je zapříčiněno nedostatkem vzduchu přímo ve spalovací směsi nebo lokálním nedostatkem ve spalovacím prostoru [26].

Koncentrace tohoto prvku je značně závislá na směsi vzduchu a paliva a je nejvyšší tam, kde součinitel přebytku vzduchu λ [28] je menší než jedna. Tato směs je klasifikována jako bohatá. Tento jev nastává zejména při startování a okamžité akceleraci motoru, kdy je vyžadována

bohatá směs. V bohaté směsi se kvůli nedostatku vzduchu nemůže všechn uhlík převést na oxid uhličitý CO_2 a vzniká tak větší koncentrace oxidu uhelnatého. Přestože se větší množství CO vytváří během provozu v bohatých směsích, malá část se produkuje při klasickém provozu [25]. Ze zdravotního hlediska se jedná o nejjedovatější složku obsaženou ve výfukových plynech [26].

2.5.2 NESPÁLENÉ UHLOVODÍKY HC

Nespálené uhlovodíky se ve výfukových plynech nachází v různých formách, souhrnně je však označujeme zkratkou HC. Uhlovodíky vznikají za velmi nepříznivých oxidačních podmínek [26]. Emise uhlovodíků se skládají z nespáleného paliva, které se nachází nejvíce v blízkosti stěn válce v důsledku nízké teploty hoření [25].

Vznětové motory většinou vykazují nízkou hladinu emisí uhlovodíků. Tyto emise vznikají nejvíce při malém zatížení motoru, přičemž největším zdrojem je chudá směs paliva a vzduchu. V takové směsi může být rychlost hoření příliš nízká na to, aby se dokončilo spalování při pracovním zdvihu pístu nebo ke spalování nemusí dojít vůbec, což zapříčiní velkou produkci emisí uhlovodíků. U naftových motorů ovlivňuje tvorbu uhlovodíku zejména druh paliva, seřízení motoru a jeho konstrukce [25].

Uhlovodíky mají škodlivé účinky jak na životní prostředí, tak i na lidské zdraví [25]. Obsahují karcinogenní aromáty, jedovaté aldehydy, nejedovaté alkany a alkeny a další látky. Tyto látky po opuštění výfukového systému reagují na slunečním světle a vytvářejí látky, které dráždí lidskou sliznici. V letních obdobích se podílejí na vzniku jedovatého přízemního ozónu [29].

2.5.3 OXIDY DUSÍKU NO_x

Vznětové motory využívají k zapálení paliva vysoce stlačený vzduch. Vzduch nasávaný do spalovací komory se skládá hlavně z kyslíku a dusíku. Za normálních podmínek dusík ve spalovací komoře s kyslíkem nereaguje a je vylučován ve stejné formě výfukovým systémem. Avšak při teplotách spalování vyšších než $1\,600\text{ °C}$ dusík reaguje s kyslíkem a vytváří emise NO_x . Za hlavní iniciátory tvorby této emise jsou tedy považovány vysoká teplota a velká koncentrace kyslíku při spalování [25].

Mezi oxidy dusíku patří [26]:

- NO – oxid dusnatý
- N_2O – oxid dusný
- NO_2 – oxid dusičitý

Největším producentem emisí NO_x je silniční doprava, která na celém světě produkuje 40–70 %. Mezi všemi vozidly je největší produkce těchto emisí právě u vznětových motorů, což je zapříčiněno zejména vyšší teplotou spalování než u jejich protějšků – zážehových motorů [25].

Emise oxidů dusíků jsou odpovědné za velké množství rizik pro lidské zdraví a životní prostředí. Přispívají k tvorbě ozonu, okyselení a tvorbě smogu, což se stalo značným problémem pro velká města po celém světě. Oxid dusnatý a dusičitý jsou považovány za toxické, přičemž oxid dusičitý má až pětkrát vyšší úroveň toxicity než oxid dusnatý, proto je také přímým důsledkem plicních onemocnění. Může působit dráždivě při vdechnutí a snížit odolnost vůči respiračním infekcím jako je například chřipka [25].

2.5.4 PEVNÉ ČÁSTICE PM

Emise PM (Particulate Matter [29]) se vyskytují jak v plynném, tak i kapalném stavu. Řadíme mezi ně saze, zbytky nespáleného motorového oleje a paliva, karbon, popel, otěrové částice a jiné. I přesto však nemáme pro pevné částice všeobecnou definici, která by určovala jejich přesné složení [26]. Emise pevných částic jsou u vznětových motorů 6 až 10krát vyšší než u zážehových. Více než 50 % celkových emisí PM tvoří saze [25]. Nikdy však není možné stanovit přesné složení pevných částic, jelikož závisí na mnoha různých faktorech. Mezi tyto faktory se řadí například uspořádání spalovacího prostoru, provedení palivové soustavy, aktuální zatížení motoru, kvalita motorového oleje a dodávaného paliva [26].

V minulosti už bylo provedeno mnoho výzkumů ke zjištění dopadu emisí PM na lidské zdraví a životní prostředí. Bylo zjištěno, že vdechnutí těchto částic může způsobit závažné zdravotní potíže, jako je astma, rakovina plic a další kardiovaskulární problémy. Pevné částice také přispívají ke znečištění ovzduší, vody a půdy. Mohou taktéž ovlivnit produktivitu zemědělství a globální změnu klimatu [25].

V následující tabulce jsou uvedeny průměrné produkce emisí vznětových motorů při volnoběhu a jejich porovnání s hodnotami při plném zatížení [26]:

Tab. 3 Typické složení výfukových plynů vznětového motoru [26]

Složky výfukových plynů	Jednotka	Při volnoběhu	Při max. zatížení
Oxidu dusíku NOx	ppm	50-100	600-2000
Uhlovodíky HC	ppm	50-500	<50
Oxid uhelnatý CO	ppm	100-450	<300
Oxid uhličitý CO₂	% vol.	...3,5	Přibližně 12
Vodní pára H₂O	% vol.	2-4	...11
Kyslík O₂	% vol.	18	4-8
Dusík N₂		zbytek	zbytek
Teplota výfukových plynů	°C	100-150	550-800
ppm (parts per milion) – miliontina množství			

3 PLYNNÁ PALIVA

Plynná paliva pro pohon automobilů jsou v současné době opět na vzestupu z důvodu úspor ropných kapalných paliv. Dalším důvodem tohoto trendu je plnění emisních norem, jelikož spaliny z plyných paliv obsahují menší množství škodlivých látek než spaliny z kapalných [30].

V současnosti se pro pohon osobních, nákladních automobilů a autobusů nejvíce využívá zejména zkapalněná propan-butanová směs (LPG – liquefied petroleum gas), stlačený zemní plyn (CNG – compressed natural gas) a v menším zastoupení i zkapalněný zemní plyn (LNG – liquefied natural gas) [30].

Vozidla poháněná plynými palivy mají v porovnání s jejich konkurenty spalující kapalná paliva řadu výhod [30]:

- Nižší cena paliva a s tím i spojené nižší náklady na provoz vozidla
- Vozidla poháněná CNG dosahují menší hlučnosti
- Plynná paliva lépe vytvářejí homogenní směs, což zajišťuje rovnoměrnější plnění válců motoru
- Zemní plyn má vyšší oktanové číslo (tab. 4) než benzín, což u zážehových motorů umožňuje zvýšit stupeň komprese a tím i termickou účinnost motoru
- Plynná paliva neznečišťují motorový olej, což zvyšuje životnost oleje a snižuje náklady na případnou výměnu
- Nižší emise polyaromatických uhlovodíků (včetně karcinogenních), aromatických uhlovodíků (včetně benzenu), tuhých částic a u motorů poháněných CNG menší emise nemetanových uhlovodíků

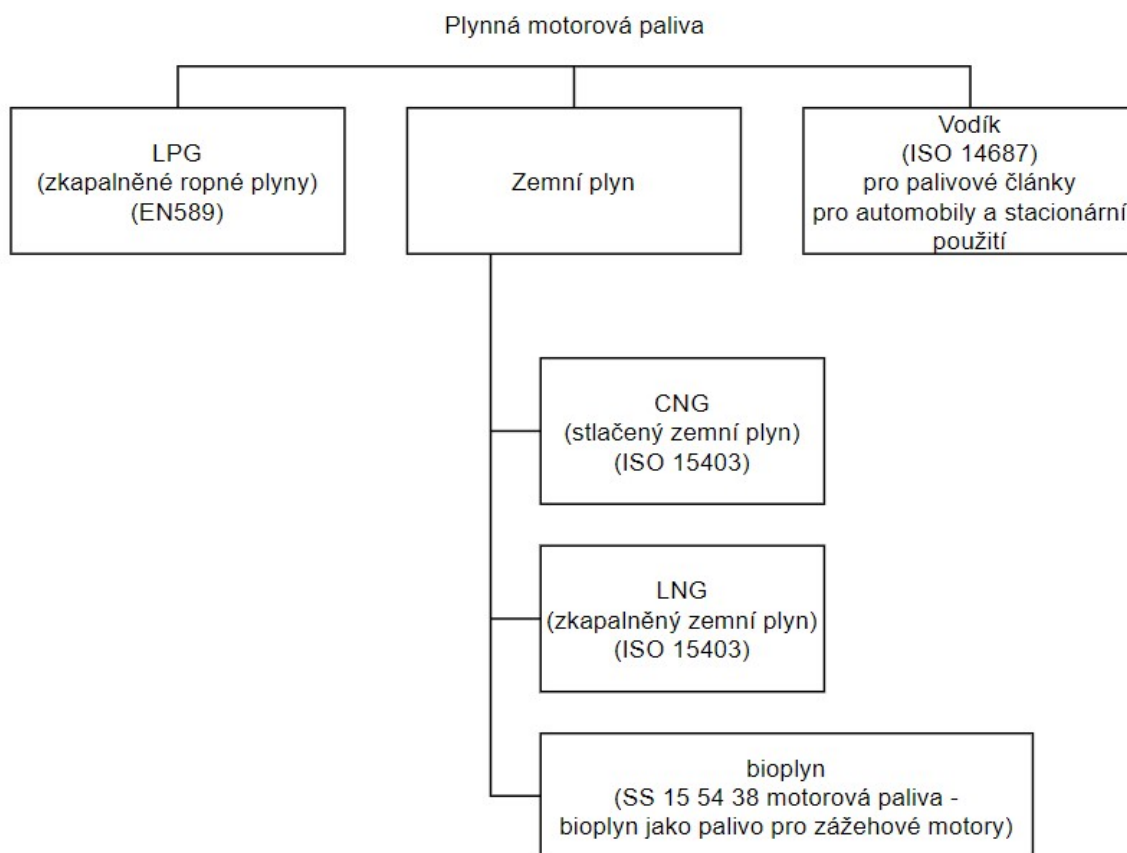
Tab. 4 Oktanová čísla plyných uhlovodíků [30]

Uhlovodík	OČVM	Uhlovodík	OČVM
Metan	>110	n-Butan	94
Etan	107	i-Butan	101
Propan	106	n-Pentan	62

Mezi nevýhody plyných paliv můžeme zařadit [30]:

- Zvýšené náklady na palivovou soustavu, popřípadě přestavbu motoru
- Zvýšená hmotnost vozidla vlivem hmotnosti zásobních tlakových lahví
- U osobních vozidel zmenšení zavazadlového prostoru, respektive nárůst výšky u autobusů, v důsledku instalace tlakových lahví
- Dodatečné náklady na technické a bezpečnostní úpravy garáží, popřípadě servisních zařízení

3.1 PŘEHLED PLYNNÝCH PALIV



Obr. 7 Přehled plynných alternativních paliv a paliv z obnovitelných zdrojů [5]

3.2 LPG

Hlavními složkami LPG jsou propan a butan. Propan je nenasycený uhlovodík s výhřevností 46 MJ.kg^{-1} . Butan je vysoce hořlavý a snadno zkapalnitelný plyn s výhřevností 45 MJ.kg^{-1} [31].

Celková směs je složená z propanu, butanu a dalších látek v menším zastoupení, avšak neobsahuje žádné olovo, benzenové uhlovodíky a jen velmi málo síry [32]. Tuto směs je možno zkapalnit ochlazením na nízkou teplotu nebo jejím stlačením. Při přechodu z plynné na kapalné skupenství se objem směsi zmenší až 260krát. LPG je z energetického hlediska podobné benzínu. Jeho energetická hodnota je 45 MJ.kg^{-1} a hustota $0,55 \text{ kg.l}^{-1}$. LPG je v plynném skupenství těžší než vzduch a jako kapalina je lehčí než voda [31].

Z pohledu na lidské zdraví LPG není toxické, avšak je nedýchatelné s mírně toxickými účinky. Směs propanu a butanu je bezbarvá a bez zápachu. Pro případné zjištění úniku LPG se musí do směsi přidávat další prvky [31].

Tankování LPG probíhá téměř stejně jako klasické tankování benzínu nebo nafty [32]. Síť čerpacích stanic LPG v České republice stále roste a už nyní čítá téměř 1 000 stanic [33]. Mezi další výhody tohoto plynového pohonu řadíme jeho cenu. Cena jednoho litru propan-butanové

směsi se stále pohybuje okolo poloviny ceny benzínu ve stejném množství [32, 34]. I přes fakt, že spotřeba motorového vozidla na zkapalněný plyn je asi o 20 % vyšší, je provoz z ekonomického hlediska výhodnější [32].

V posledních letech je užívání motorových vozidel na alternativní pohon LPG na vzestupu. Tento trend je zapříčiněn vysokou cenou pohonných hmot a postupným odbouráváním nedůvěry veřejnosti vůči provozu a bezpečnosti takto upravených vozidel. Zkušenosti nasbírané za delší řadu let poukazují na to, že nebezpečí úniku plynu při případné havárii a jeho následný výbuch či vznícení je minimální [32].

LPG jako motorové palivo podléhá nižším sazbám daně, jelikož produkuje méně emisí a jeho výfukové plyny mohou být v katalyzátoru přeměňovány i při nízkých teplotách. Zároveň neobsahuje téměř žádnou síru, čímž předchází tvorbě škodlivých sazí. I proto jsou vozidla poháněná tímto plynem jedinými vozidly, která mohou být použita i uvnitř budov [35].

VÝROBA LPG

LPG se vyrábí ze tří hlavních zdrojů [36]:

- jako vedlejší produkt při odplyňování zemního plynu
- jako vedlejší produkt při stabilizaci ropy
- jako vedlejší produkt z rafinace ropy

Z celosvětové produkce LPG je pro pohon spalovacích motorů využito cca 10 % [36].

Zemní plyn po vytěžení obsahuje zejména metan, ale také další látky, mezi nimi i těžší uhlovodíky. Tento zemní plyn nazýváme „mokrý“ a než je připraven k přepravě je potřeba odstranit LPG frakci procesem odplynění. Další značné množství LPG získáváme při stabilizaci ropy přímo v místě těžby. Tento proces je taktéž součástí přípravy pro přepravu. Stabilizací ropy se celosvětově získává přibližně 60 % LPG. Zbylá produkce LPG se zajišťuje rafinací ropy. Dle typu ropy se obsah frakce LPG pohybuje mezi 1 až 4 %. Složky zkapalněného plynu se z ropy získávají destilačními operacemi a procesem hydrogenace [36].

Stručně řečeno, LPG se získává jako vedlejší produkt při těžbě ropy a zemního plynu, což je hlavní důvod nízké ceny LPG oproti ostatním palivům. Pro jeho použití jako motorového paliva musí projít procesem zdokonalení, při kterém je snížen obsah síry na úroveň požadovanou právními předpisy o životním prostředí [36].

Zkapalněné ropné plyny LPG podléhají v České republice normě ČSN EN 589. Tato norma platí pro LPG definovaný jako nízkotlaký zkapalněný plyn složený z jednoho nebo více lehkých uhlovodíků a zejména pak z propanu, propenu, butanu, izomerů butanu, butenů se stopami jiných uhlovodíkových plynů. Tato norma udává technické požadavky a metody zkoušení pro motorový zkapalněný ropný plyn. Poslední aktualizace této normy proběhla v srpnu 2019 a jedná se již o sedmé vydání [37].

3.3 CNG

Stlačený zemní plyn CNG se skládá přibližně z 85 % metanu, 10 % dusíku a z 5 % vyšších uhlovodíků. Metan je jednoduchý uhlovodík, bez barvy a zápachu. Je hořlavý a při kontaktu se vzduchem se z něj stává vybuchující plyn [32].

Zemní plyn používaný pro pohon vozidel se nijak neliší od plynu, který používáme doma k vaření či topení. CNG se vyrábí stlačováním konvenčního zemního plynu na méně než 1 % objemu, který zabírá při standardním atmosférickém tlaku. Skladuje a distribuuje se v pevných obvykle kovových válcových nádobách při tlacích 20–25 MPa [38]. Skladovací nádrže a nádrže umístěné na vozidlech musí být kvůli takto vysokým tlakům velice robustní [39].

Stlačený zemní plyn je levnější než benzín nebo motorová nafta, dokonce je levnější než propan-butanová směs. Je vhodný pro využití ve vozových parcích, které spotřebovávají velké množství paliva a doplňují palivo na centralizovaných místech. Lze jej však využít ve všech třídách vozidel – motocykly, osobní automobily, dodávky, lehká a těžká nákladní vozidla, autobusy, vysokozdvizné vozíky, lokomotivy, dokonce lodě i trajekty [40].

Snížená produkce škodlivin je u stlačeného zemního plynu zapříčiněna jeho chemickým složením. Skládá se totiž zejména z metanu, který je považován za jeden z nejjednodušších uhlovodíků. Vozidla poháněná CNG produkují méně oxidů dusíku a uhlíku, pevných částic, aromátů a dalších látek. Vozidla poháněná zemním plynem mají taktéž menší vliv na tvorbu skleníkového efektu [32]. V následující tabulce je uvedeno srovnání produkce emisí autobusu poháněného motorovou naftou a zemním plynem.

Tab. 5 Porovnání emisí autobusu na zemní plyn a klasického autobusu na naftu [32]

	NO_x [g/kWh]	CO [g/kWh]	NMHC [g/kWh]	PT [g/kWh]	CH₄ [g/kWh]
Autobus na naftu	13,4	4,6	5,9	0,3	-
Autobus na zemní plyn	2,9	0,3	0,03	0,06	2,7

Zemní plyn se lépe mísí se vzduchem, díky čemuž má palivová směs rovnoměrnější složení. Spalování pak může pracovat s vysokým součinitelem přebytku vzduchu. Dvoupalivové systémy dosahují zvýšení celkového dojezdu. Užíváním CNG se nezanáší vnitřní části motoru karbonovými úsadami. Motor a samotný motorový olej tak mají delší životnost [32].

O vozidlech na zemní plyn se dá jednoznačně říct, že jsou stejně bezpečná jako vozidla na kapalná paliva. V porovnání s kapalnými palivy (benzín, nafta, LPG) je CNG lehčí než vzduch. Při případném úniku se plyn odvětrá do atmosféry a nedrží se u země jako LPG, které za určitých okolností může způsobit výbuch. Navíc tlakové nádrže na CNG se vyrábí pod nejpřísnějšími bezpečnostními předpisy a testy. Ve výsledku tak tvoří nejstabilnější a nejbezpečnější komponent samotného vozidla. Tlakové láhve jsou odtlakovány bezpečnostním ventilem, díky čemuž nemůže dojít k výbuchu v případě havárie či požáru vozidla [41].

Pohon stlačeným plynem CNG však stále trápí nedostatečná infrastruktura [32]. Zejména se jedná o síť plnicích stanic, kterých je v Česku jen něco málo přes 200 [42]. Zároveň auta poháněná CNG mají nevýhodu vyšší pořizovací ceny, která by však postupem času s vyšším užíváním tohoto paliva měla klesat. Dále přichází uživatel klasického osobního automobilu o část zavazadlového prostoru v důsledku umístění tlakových nádob do tohoto prostoru [32].

Jak je možno vidět z následující tabulky, CNG stanic i vozidel s tímto pohonem v České republice meziročně stále přibývá.

Tab. 6 Statistika rozvoje CNG v ČR v období 2004 až 2019 [43]

	Veřejné plynové stanice CNG	CNG auta celkem	CNG osobní vozy	CNG autobusy	Prodej CNG [mil.m3]	Nárůst prodeje CNG [%]
2004	9	250	150	100	2,773	-
2005	9	450	280	165	3,010	8,5
2006	11	580	400	180	3,584	19,1
2007	17	900	680	195	5,790	61,6
2008	17	1 200	950	215	6,758	16,7
2009	23	1 800	1 465	270	8,082	19,6
2010	32	2 500	2 112	300	10,058	24,4
2011	34	3 250	2 807	336	12,089	20,2
2012	45	4 300	3 818	362	15,242	26,0
2013	50	6 300	5 747	404	21,952	44,0
2014	75	8 055	7 205	518	29,912	36,3
2015	108	12 000	10 750	820	43,589	45,7
2016	143	15 500	13 970	1 020	59,346	36,1
2017	164	18 900	17 160	1 120	67,603	13,9
2018	185	22 600	20 660	1 234	75,832	12,2
2019	207	25 310	23 036	1 453	90,433	20,4

Zejména můžeme pozorovat snahu zavádět do dopravní infrastruktury autobusy s CNG pohonem. V České republice je dohromady provozováno okolo 20 000 autobusů [44]. V roce 2019 toto číslo tvořili zhruba ze 7 % právě autobusy na CNG. Do budoucna se však očekává, že toto číslo bude narůstat. Podle predikcí bude vozidel na CNG přibývat nejvíce v oblasti autobusové a kamionové dopravy, jelikož pro firmy to znamená velké úspory na pohonných hmotách [44].

4 VYUŽITÍ PLYNNÝCH PALIV VE VZNĚTOVÝCH MOTORECH

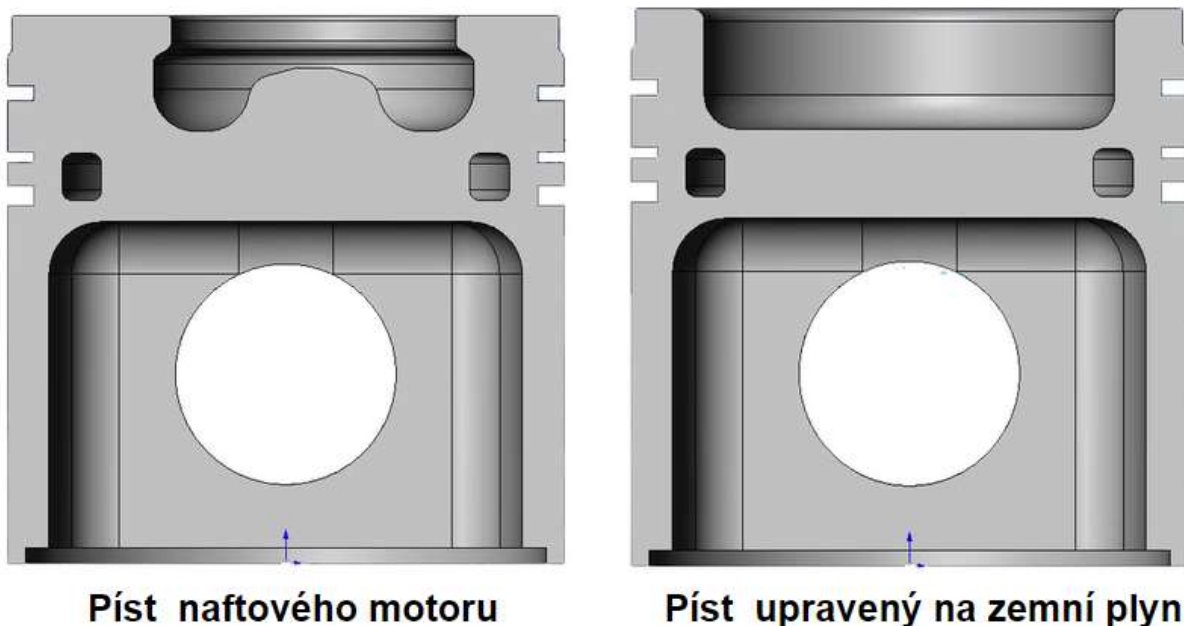
Pro použití plynného paliva ve vznětovém motoru je nutná přestavba. Využívá se buď kompletní přestavba vznětového motoru na motor zážehový, kdy motor spaluje jen plynné palivo, nebo přestavba na duální pohon plyn-nafta [45]. Kombinace plynu a nafty, zvaná Dieselgas, je ve světě známá již řadu let. Zejména v Austrálii a Severní Americe je tato technologie hojně využívána. U nás se s mixováním těchto dvou paliv začalo až v poslední době, zejména z důvodu zdražování pohonných hmot [46].

4.1 PŘESTAVBA NA ZÁŽEHOVÝ MOTOR

Přestavbu naftového motoru pro spalování výhradně plynného paliva je možno využít pro autobusy, nákladní automobily i stacionární aplikace. Pro tuto přestavbu jsou potřeba písty (obr. 8), které zajistí nižší kompresní poměr, vstřikovače plynného paliva, zapalovací svíčky a také elektronický kontrolní modul společně se senzory. Pro aplikace, které vyžadují mimořádně nízké emise se může společně s přestavbou nainstalovat i nový katalyzátor [47].

Přestavba zahrnuje následující kroky [47]:

- demontáž původního motoru
- kontrola součástí a jejich případná výměna
- úprava pístů pro použití plynu (nižší kompresní poměr)
- úprava hlavy válců pro zapalovací svíčky
- instalace senzoru vačkové hřídele a rozvodového kola
- zpětná montáž motoru
- instalace škrtkové klapky, systému zapalování a zapalovacích svíček
- seřízení motoru

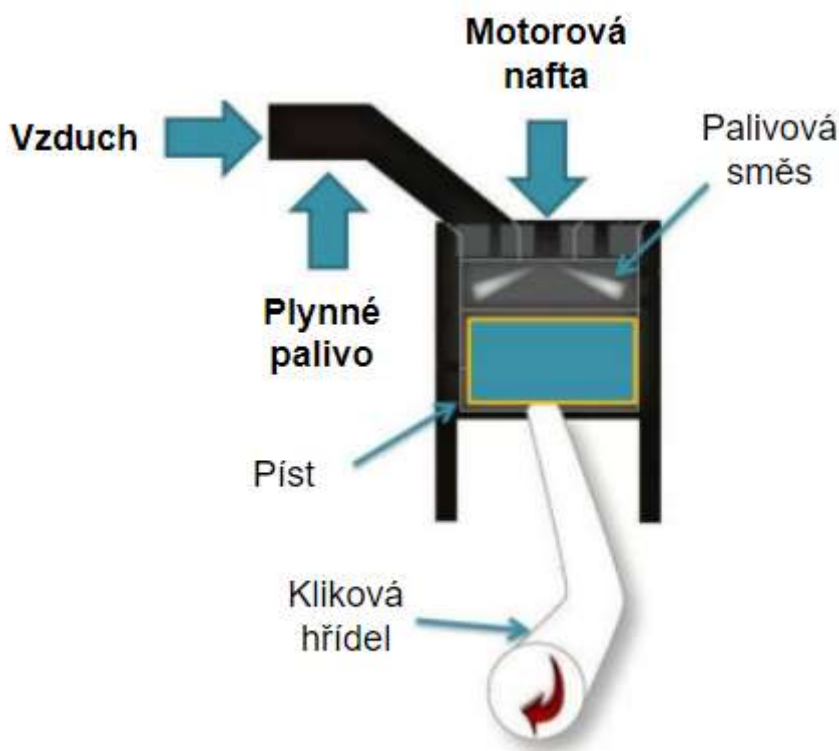


Obr. 8 Modifikace pístu [47]

Tato přestavba je velice časově i finančně náročná. Motor při ní prochází nevratnými změnami, z důvodu mechanické úpravy pístů a nahrazení vstřikovačů nafty zapalovacími svíčkami. Tyto vysokonapěťové části zapalování se sebou nesou vyšší nároky na údržbu ve srovnání se vstřikovači motorové nafty. Vozidlo po přestavbě již není možno uvést do původního stavu. Instalaci škrtící klapky se taktéž snižuje účinnost motoru [48].

4.2 PŘESTAVBA NA DUÁLNÍ POHON (DIESELGAS)

U této přestavby nedochází ke spalování výhradně jen plynné fáze, jako je tomu u přestavby na zážehový motor. Plynné palivo je přidáváno do nasávaného vzduchu (obr. 9), který je poté přiváděn do spalovací komory. Samotný motor však stále pracuje na motorovou naftu. Přidávání plynného paliva do nasávaného vzduchu má poté za výsledek rychlejší zapálení směsi, její dokonalejší prohoření a s tím související účinnější využití energie paliva [49].



Obr. 9 Schéma vstřikování paliva motoru s duálním pohonem (upraveno) [50]

Motory Dieselgas můžeme dále dělit podle použitého plynu [51]:

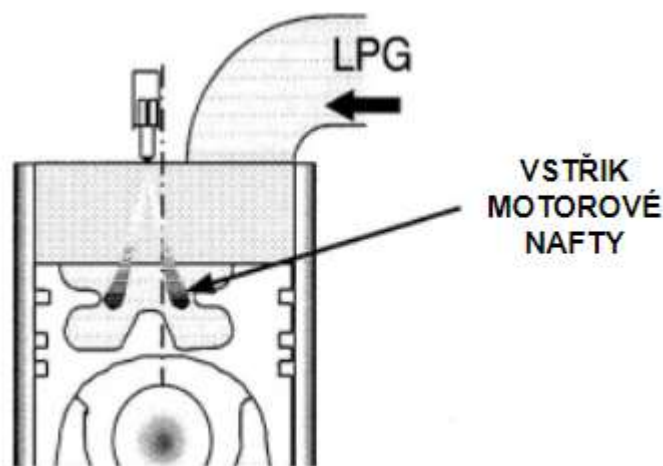
- Dieselgas LPG (nafta + LPG)
- Dieselgas CNG (nafta + CNG)

Přidáním plynu do nasávaného vzduchu zásadně měníme složení spalované směsi ve válcích. Výsledná směs je však nadále zapalována vstříknutou naftou pod vysokým tlakem [52]. Motory Dieselgas mohou také fungovat samostatně jen na motorovou naftu v případě nedostatku plynového paliva [53]. Obě alternativní plynná paliva mají své výhody a nevýhody [54].

4.2.1 DIESELGAS LPG

Označení Diesलगas LPG nesou motory, které využívají ke svému pohonu kombinaci motorové nafty a LPG. Samotné LPG má ve srovnání s jinými plynnými palivy vysokou výhřevnost a také vysoké oktanové číslo. Má však nízké cetanové číslo, což znemožňuje využití tohoto paliva samostatně ve vznětovém motoru. Lze jej tedy využít u vznětových motorů pouze v režimu duálního paliva [55].

Propan-butanová směs je mísená se vzduchem buď přímo v sacím potrubí, nebo je možno ji vstříkovat přímo do válce. V takto upraveném motoru, kde se mísí vzduch s LPG, je LPG považováno za primární palivo, jelikož je hlavním zdrojem energie dodávané do motoru. Primární plynné palivo je společně se vzduchem ve válci stlačeno, avšak díky vysoké teplotě samovznícení se tato směs nevznítí. V tomto okamžiku je zapotřebí do válce vstříknout malé množství motorové nafty, stejně jak je tomu u konvenčního vznětového motoru. Vstříknutá nafta se poté vznítí a působí jako spouštěč pro spalování směsi plynného paliva a vzduchu (Obr. 10). Vstříknutá nafta však přispívá jen malý dílem na celkový výkon motoru. Proces spalování u motorů Diesलगas je tedy složitý, jelikož kombinuje vlastnosti zážehových a vznětových motorů. Motor lze taktéž kdykoli přepnout zpět na spalování výhradně jen motorové nafty [55].



Obr. 10 Schéma vstřikování paliva motoru Diesलगas LPG (upraveno) [55]

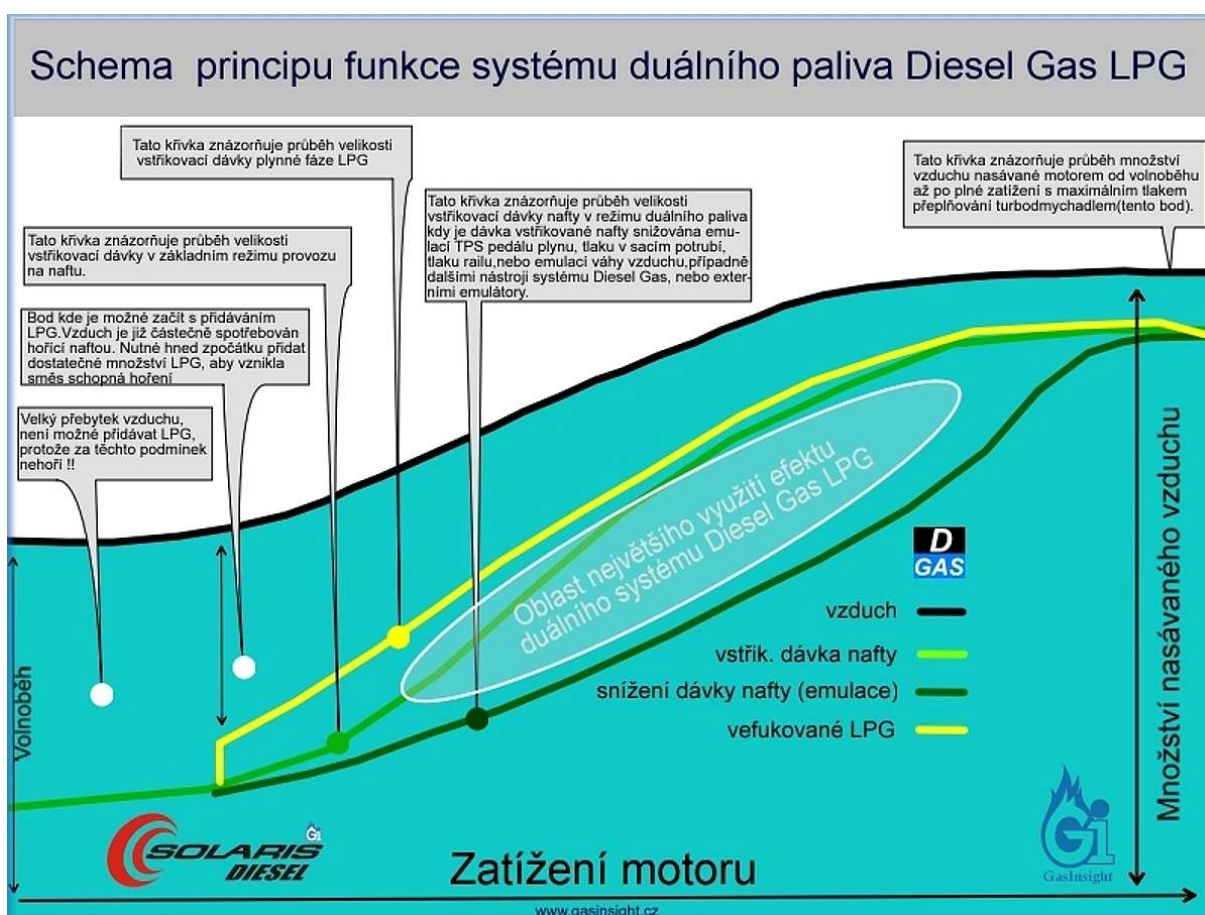
Přestavba motoru je naprosto neinvazivní. Spočívá v instalaci reduktoru tlaku plynu a řídicí jednotky plynu. Do sacího potrubí jsou poté zavedeny dva výstupy vstřikovačů LPG a na výfukové potrubí je namontován EGT senzor (senzor teploty výfukových plynů). Samozřejmostí je instalace samotných nádrží LPG. Díky poměru spotřeby plynu a nafty cca 20:80 však není potřeba montovat tyto nádrže s velkými rozměry [56]. Plyn je skladován v tlakové nádobě ve zkapalněné formě. Ve stejné formě je poté dopraven trubicí do reduktoru, který sníží tlak kapalného plynu jeho expanzí a přemění ho tak na plynnou fázi [49].

Hlavní komponentou je elektronická řídicí jednotka plynu, která ovládá oba plynové vstřikovače a řídí dávkování plynu. Dávkování se odvíjí od zatížení a jízdních režimů motoru [56].

Elektronická řídicí jednotka plynu pracuje na základě těchto parametrů [49]:

- otáčky motoru
- tlak v sacím potrubí motoru
- průtok (množství) nasávaného vzduchu
- poloha plynového pedálu
- teplota výfukových plynů
- tlak plynu ve vstřikovačích
- teplota reduktoru
- teplota plynu

Po zpracování těchto údajů upraví řídicí jednotka velikost vefukované (jedná se o plynou fází [56]) dávky do spalovacího prostoru. Dávkování se řídí mnoha proměnnými a nejužitečnější je popsáno v následující trojrozměrné mapě [49].



Obr. 11 Schéma principu funkce duálního paliva Dieselgas LPG [49]

Korekce vstřikované dávky je prováděna elektronickou řídicí jednotkou na základě teploty a tlaku plynu. Tato korekce je nutná z důvodu zachování množství dávky i při různých teplotách a tlacích plynu (hustota/měrná hmotnost LPG) [49].

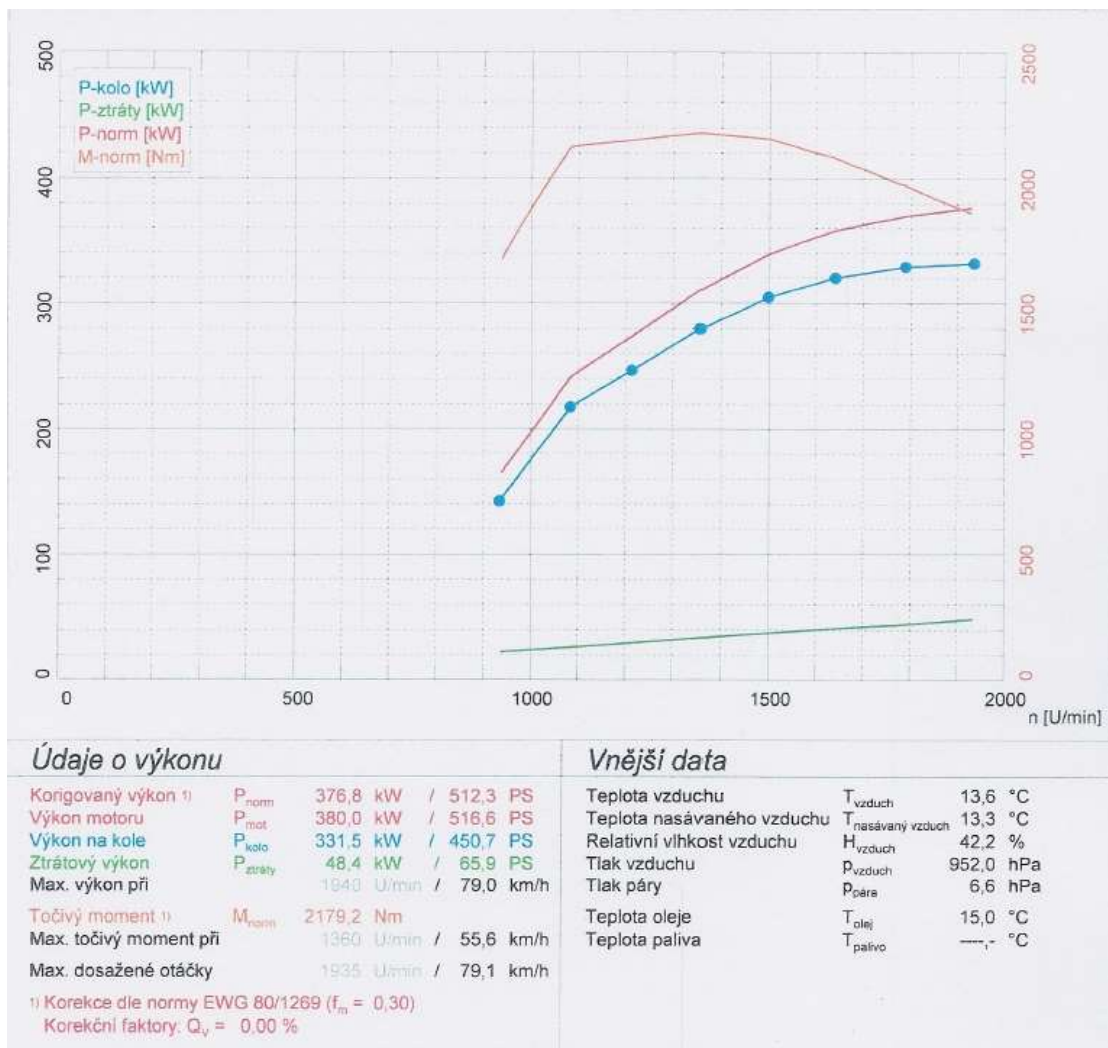
Před případným detonačním spalováním je systém chráněn velmi přesným a rychlým snímačem teploty výfukových plynů. Ten bývá instalován těsně za turbodmychadlem ve výfukovém potrubí. Snímač má za úkol hlídat zvyšování teploty výfukových zplodin a odhalit tak možnost

detonačního spalování. V případě zvýšení této teploty jednotka okamžitě sníží dávku LPG a teplota výfukových zplodin se tak sníží [49].

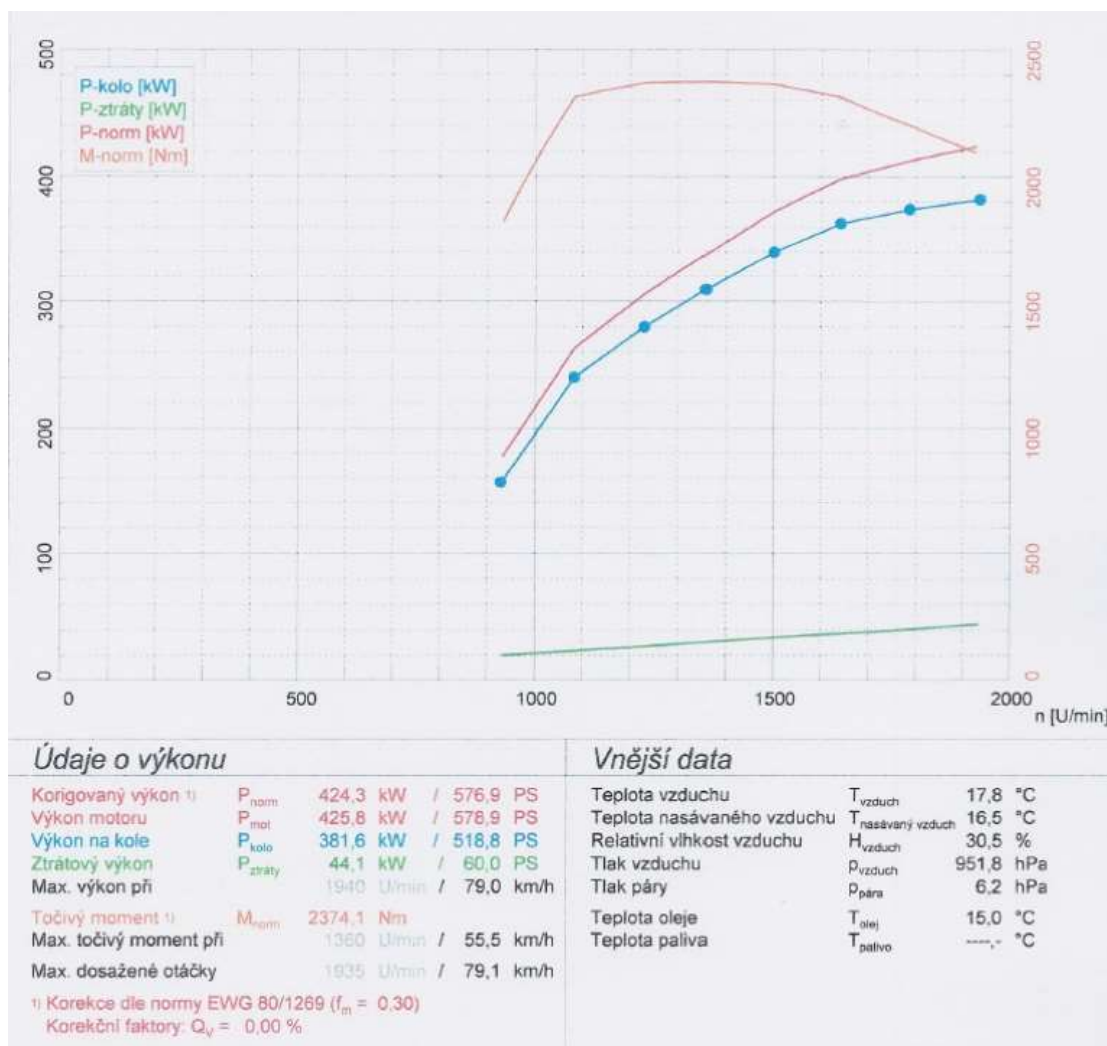
Výkon motoru je obvykle řízen změnou množství přivedeného LPG paliva do sacího potrubí. Nižší obsah LPG nemusí mít žádný vliv na snížení emisí a zvýšení výkonu, současně mnohem vyšší dávka LPG může způsobit rychlé zvýšení tlaku ve válci a motor poškodit. Množství použité nafty se liší v závislosti na provozních podmínkách motoru a jeho konstrukčních parametrech. Obecně se však množství vstříkované nafty potřebné k zapálení směsi pohybuje okolo 10 až 20 % oproti klasickému režimu na motorovou naftu [55].

Plyn ve spalované směsi působí jako katalyzátor hoření. Umožňuje snazší zapálení nafty a dokonalejší prohoření celé směsi. Díky tomu dochází k výraznému nárůstu účinného tlaku ve válci motoru, což značně zvyšuje jeho krouticí moment a s tím spjatý výkon [56].

Na následujících dvou grafech lze vidět srovnání výkonu pohonu na naftu a duálního pohonu nafta + LPG.



Obr. 12 Graf výkonu na motorovou naftu [57]

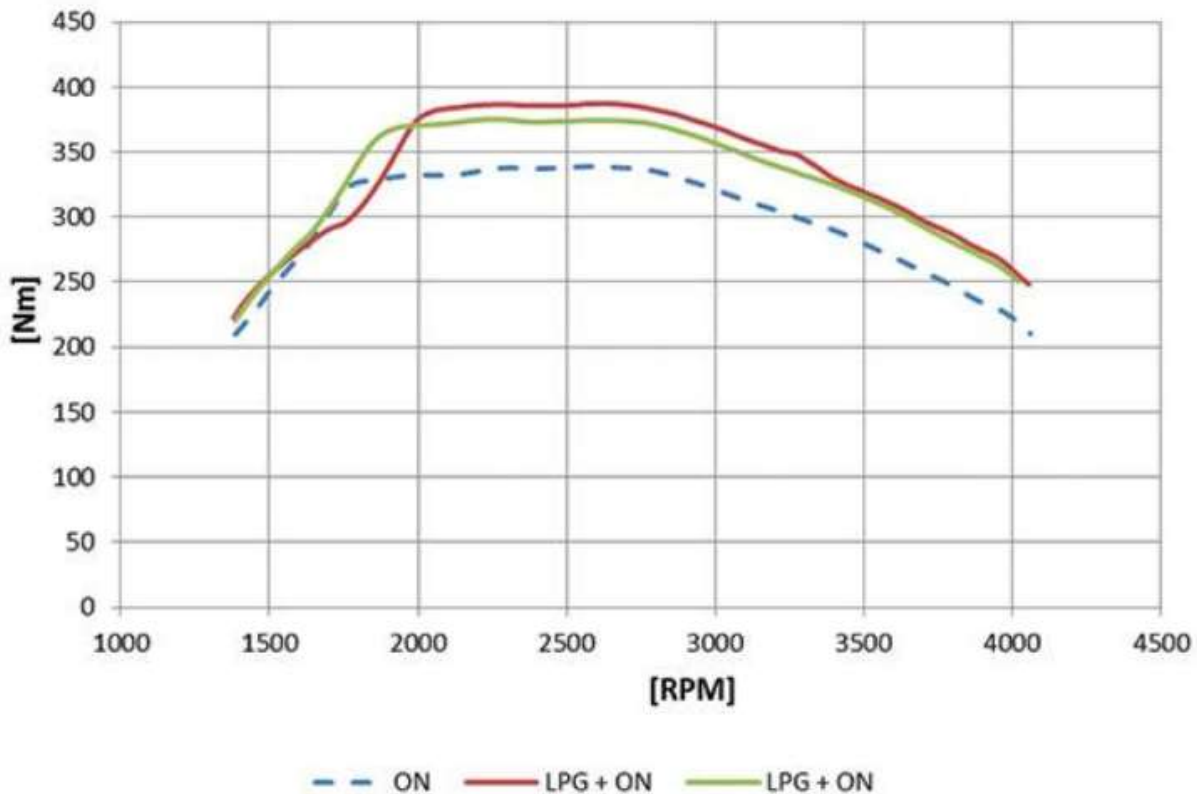


Obr. 13 Graf výkonu na duální pohon nafta + LPG [57]

Grafy byly vytvořeny z měření na vozidle DAF XF 480, které proběhlo na jaře roku 2012 [57].

Z odečtených údajů je možné vidět 12% nárůst výkonu a 9% nárůst točivého momentu u motoru s duálním pohonem vůči pohonu na motorovou naftu. V některých případech může nárůst výkonu být až 30 %. Motor taktéž pracuje velmi pružně a má měkčí chod. Využitím duálního pohonu se prodlužuje životnost motoru díky redukcí opotřebení. Dokonalejší spalování směsi nafty a LPG méně zanáší filtr pevných částic, což také výrazně snižuje spotřebu kapaliny AdBlue (močoviny), jestliže je vozidlo touto technologií vybaveno [57].

Výkon a kroutící moment motoru se také odvíjí od množství použitého LPG, jak je možno vidět z následujícího grafu závislosti kroutícího momentu na nastavení systému. V grafu se nachází tři křivky, každá charakterizuje použití jiného složení spalované směsi [58].



Obr. 14 Závislost kroučícího momentu na nastavení systému [58]

(modrá křivka – pouze nafta, zelená křivka – menší množství LPG, červená křivka – větší množství LPG)

4.2.2 DIESELGAS CNG

Další variantou duálního pohonu je systém Diesलगas CNG. Tento systém využívá jako druhé palivo stlačený zemní plyn. Princip fungování systému je téměř totožný jako u Diesलगas LPG [54]. Zemní plyn má stejně jako propan-butanová směs nízké cetanové číslo, proto může být využit ve vznětových motorech pouze v režimu duálního paliva [53].

U systému Diesलगas CNG je do přívodu vzduchu přidáván zemní plyn ve formě plynné fáze za nízkého tlaku, přičemž motorová nafta se zavádí přímo do spalovací komory těsně před dosažením konce kompresního zdvihu. Obě paliva jsou smíchána za vzniku chudé směsi a jsou zapálena stlačením ve válci [53].

Přestavba motoru pro využití tohoto systému nevyžaduje žádné zásadní zásahy do konstrukce motoru. Nejsou při ní potřeba žádné nevratné úpravy motoru, navíc montáž není nijak náročná. Do kabiny vozidla se umístí ovládací tlačítko, které slouží k přepínání provozního režimu motoru mezi duálním a základním režimem, kdy vozidlo spaluje jen motorovou naftu stejně jako před přestavbou. Vozidlo je také možné kdykoli převést do původního stavu demontáží systému [54].

Vozidlo bývá zpravidla osazeno větším počtem nádrží na CNG z důvodu dosažení uspokojivého dojezdu při zapnutém duálním režimu. Pokud CNG v nádržích při jízdě dojde, systém je sám automaticky přepnut zpátky do základního režimu. Jakmile je CNG opět natankováno, systém se opět sám přepne do duálního režimu [54].

Přidáním CNG do nasávaného vzduchu získáme v kombinaci se vstříknutou motorovou naftou palivovou směs, která má lepší vlastnosti než samotná motorová nafta. Mezi lepší vlastnosti patří zejména rychlejší zapálení a dokonalejší prohoření směsi. Výstupní parametry motoru se poté mění na základě poměru užití nafty a CNG. U motoru dochází k nárůstu točivého momentu zejména v nízkých otáčkách. Díky vysokému oktanovému číslu CNG má motor také klidnější chod. Společně s vysokým oktanovým číslem má CNG vynikající antidetonační vlastnosti a široký rozsah hoření směsi s vysokým přebytkem vzduchu. Tento fakt umožňuje při spalování využít vysoký podíl CNG (až 70 %), kterým je nahrazena motorová nafta. Přidáním dalšího paliva do nasávaného vzduchu není zapotřebí vstříknout velké množství nafty pro zachování stejného výkonu. Díky tomuto pak není při jízdě potřeba tolik šlapat na plynový pedál, aby si vozidlo zachovalo stejnou rychlost jako při pohonu na samotnou naftu. Z ekonomického hlediska je duální pohon velice výhodný, jelikož menší dávka nafty je doplňována levnějším CNG [54].

Technologie Dieselgas CNG se skládá z řídicího systému a výkonných prvků. Nejdůležitějším prvkem je elektronická řídicí jednotka (ECU) a její kabelový svazek. Ten propojuje jednotku s dalšími prvky systému. Při montáži je potřeba nainstalovat reduktor CNG a napojit vodu pro jeho ohřev [59]. Reduktor CNG je součástí, která snižuje tlak vysoce stlačeného zemního plynu z nádrže (220 bar) na tzv. systémový tlak (2-9 bar) vstřikovací lišty vstřikovačů CNG. Při takto velkém tlakovém rozdílu dochází k expanzi stlačeného plynu. Při expanzi dochází k odběru tepla a tím ochlazení reduktoru, proto musí být napojen na primární okruh chlazení motoru a být ohříván teplou vodou. Tyto součásti bývají velmi komplikované a složité na výrobu, z tohoto důvodu jsou také velmi drahé [60].

Dále je při montáži potřeba vyvrtat díry do sacího potrubí pro osazení trysek CNG, osadit vozidlo nádrží pro plynné palivo a nainstalovat řídicí jednotku včetně jejich senzorů a kabelového svazku. Elektronická řídicí jednotka využívá informaci získaných ze svých senzorů, všechny další informace o motoru získává bezkontaktně z datové sběrnice CAN. Na základě těchto získaných informací jednotka řídí celý proces přidávání zemního plynu do nasávaného vzduchu [59].

Vozidlo se osazuje dvěma ventily pro plnění CNG. Při tankování je pak možno využít stojan jak na levé, tak na pravé straně, jelikož ventil pro plnění se nachází na obou stranách vozidla. U nádrží s celkovým objemem okolo 300-350 litrů doba plnění nepřesahuje více jak 15 minut [59].

Po dokončení montáže se systém ožíví prvním spuštěním. Dále je potřeba naplnit nádrže CNG a zkontrolovat těsnost celé soustavy. Nastavení systému je dokončeno zkušební jízdou, která prověří správnou funkci duálního režimu Dieselgas CNG. Vozidla s touto přestavbou musí být náležitě označena příslušnou nálepkou (ležatý kosočtverec s bílým nápisem CNG) [59].

UKÁZKA MONTÁŽE

U montáže je nejdůležitější vybrat umístění nádrží na CNG. U nákladních aut je jednou z možností umístit nádrže za kabinou (obr. 15). Tato možnost je vhodná pro vozidla, která jezdí výhradně s návěsy typu silo, kontejner, sklápěč nebo cisterna. Při této montáži není potřeba demontovat jednu z palivových nádrží na naftu, což nesnižuje dojezd vozidla, ale naopak ho zvyšuje. Tato přestavba se nedá aplikovat na vozidla se standardními návěsy [61].



Obr. 15 Volvo FH 500 Euro 6 Nafta + CNG s nádržemi za kabinou [61]



Obr. 16 SCANIA R450 Euro 6 Diesel + CNG [62]

Další možností je instalace CNG nádob místo jedné z naftových nádrží (obr. 17). Tato možnost se využívá u vozidel se standardními návěsy, jelikož nemají dostatečný prostor za kabinou. Před samotnou montáží duálního systému Dieselgas CNG je potřeba, aby vozidlo fungovalo bez problému jen s jednou naftovou nádrží [59].

5 VLIV NA SPOTŘEBU A VZNIK EMISÍ

Ekonomika provozu a větší ochrana životního prostředí je úzce spjata se systémem Dieselgas. Tyto dva faktory ovlivňuje množství přidaného plynu do směsi vzduchu a paliva. Při velkém zatížení se z výfuku neline černý oblak. Úspora motorové nafty se u systému Dieselgas pohybuje v rozmezí 10 až 30 % v porovnání s klasickým režimem [63]. U větších a výkonnějších motorů se dosahuje většího procenta úspor pohonných hmot. Díky snazšímu zapálení a dokonalejšímu prohoření směsi se produkce emisí snižuje až o 70 %. Také dochází k účinnému shoření pevných částic [56].

5.1 DIESELGAS LPG

V následující tabulce jsou uvedena konkrétní vozidla, která byla přestavěna na duální pohon nafta + LPG. Údaje byly získány od zákazníků firmy Gasinsight, která tyto přestavby realizuje. Každé vozidlo v tabulce je ve své podstatě unikátní, protože se nachází v určitém technickém stavu a je provozováno v určitých blíže nespecifikovaných podmínkách. Z tohoto důvodu můžeme brát hodnoty uvedené v tabulce pouze jako ilustrační. I přes tento fakt je úspora paliva se systémem Dieselgas LPG prokazatelná [64].

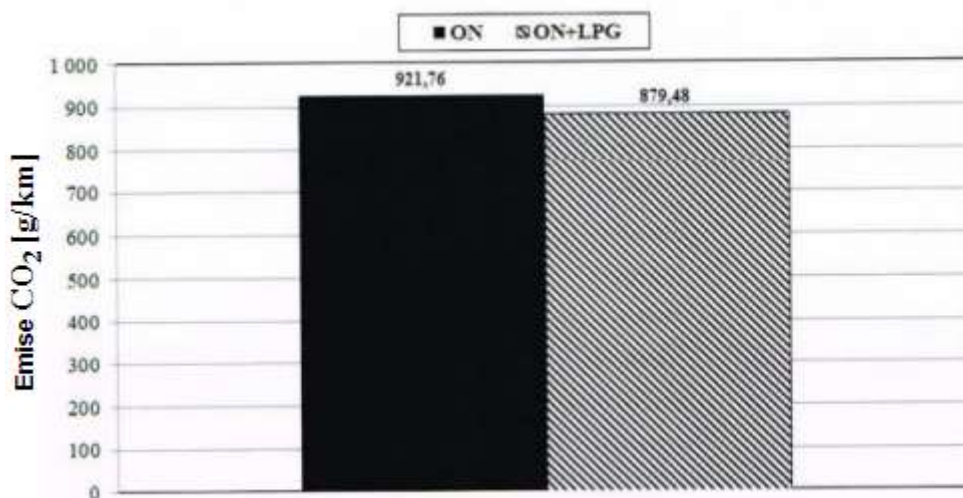
Tab. 7 Úspora na nákladech za PHM s Dieselgas LPG [64]

Značka/model	Emisní norma	Spotřeba NM [l/100 km]	Spotřeba NM+LPG [l/100 km]	Úspora na nákladech za PHM [%]
DAF XF105	Euro 5	33,5	24,5 + 7	17
DAF XF90 480	Euro 3	35	24 + 10	18
MAN TGA 460	Euro 3	35	26 + 8,5	14
VOLVO FH 12.460	Euro 4	34,5	25 + 9	15
VOLVO FH 13.460	Euro 5+	33	24 + 8	16
RENAUTL MAGNUM 480	Euro 4	36	28 + 8	12
SCANIA R420	Euro 4	35	26 + 7	16

Z tabulky lze vidět, že přibližně stejný objem motorové nafty je nahrazen plynem. Princip úspory však spočívá v poměru cen těchto paliv. Cena jednoho litru LPG se pohybuje okolo poloviny ceny motorové nafty stejného množství. U motorů vybavených technologií vstřikování Adblue (močoviny) se úspora této kapaliny pohybuje okolo 30 % [64].

Emisní charakteristika motoru s duálním pohonem na LPG a naftu je ovlivněna provozními a konstrukčními parametry motoru [55]. V říjnu 2013 byl proveden výzkum, který vedl profesor Jerzy Merksiz z technické univerzity v Poznani (Polsko). Tento výzkum se zabýval produkcí emisí CO₂ u motoru s duálním pohonem. Předmětem výzkumu byl tahač Scania R450 s motorem o výkonu 331 kW, který generuje točivý moment 2 350 Nm. Vozidlo je vybaveno filtrem pevných částic a splňuje emisní normu Euro 6. Pro tento výzkum byl vybrán úsek dlouhý 56 kilometrů, který zahrnoval městské, mimoměstské i dálniční úseky. Takto zvolený úsek měl za úkol napodobit denní trasu kamionu určeného pro dálkovou přepravu. Vstřikování plynu bylo realizováno pomocí dvou vstřikovačů do sacího potrubí (mezi vzduchový filtr a kompresor turbodmychadla). Nádrž LPG byla umístěna na místo standardní nádrže [65].

Pro měření byl použit průtokoměr pro měření hmotnostního toku výfukových plynů od firmy Semtech. Průtokoměr pracuje na principu Pitotovy trubice. Přístroj měl vlastní meteorologickou stanici, umožňující měření okolního tlaku, teploty a vlhkosti. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny výsledky měření výzkumu [65].



Obr. 17 Hodnoty emisí CO₂ získané při měření (upraveno) [65]
(ON – pohon na naftu, ON+LPG – duální pohon)

Výzkum prokázal, že použití duálního režimu přispívá k dokonalejšímu prohoření směsi paliva. Díky tomuto dochází k nižší produkci CO₂ než při standardním režimu na motorovou naftu. Vzhledem k velké spotřebě paliva a nájezdu kilometrů u nákladních automobilů můžeme toto číslo považovat za významné snížení emisí. Produkce emisí CO₂ v nákladní dopravě tvoří asi čtvrtinu všech emisí silniční dopravy. Proto může být systém Dieselgas LPG považován za jednu z reálných možností, která může přispět ke snížení emisí CO₂ v nákladní dopravě [66].

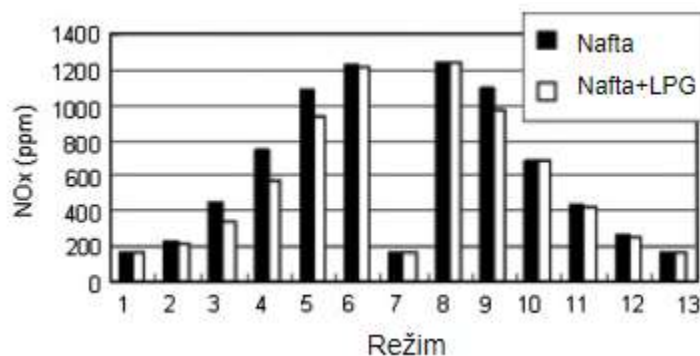
System má taky kladný vliv na snižování emisí oxidů dusíku. Tento fakt byl dokázán ve výzkumu, který vedl Dong Jian z technické univerzity ve Wuhanu (Čína). Výzkum byl proveden na šestiválcovém vznětovém motoru, který využíval ke vstřikování LPG speciálně

zkonstruovanou hřídel. Tato hřídel automaticky měnila průtok LPG v závislosti na provozních podmínkách motoru. Měření emisí proběhlo při kombinaci třinácti různých zatížení a otáček motoru, které jsou zobrazeny v následující tabulce [55].

Tab. 8 Režimy motoru pro měření emisí [55]

Režim	Zatížení	Ot/min
1	volnoběh	600
2	10 %	2 000
3	25 %	2 000
4	50 %	2 000
5	75 %	2 000
6	100 %	2 000
7	volnoběh	600
8	100 %	3 000
9	75 %	3 000
10	50 %	3 000
11	25 %	3 000
12	10 %	3 000
13	volnoběh	600

Při výzkumu byly naměřeny hodnoty, které jsou zaznamenány v následujícím grafu.



Obr. 18 Vliv zatížení a otáček motoru na emise NO_x (upraveno) [55]

Z grafu lze vyčíst, že produkce emisí oxidů dusíku se nejvíce snížila v nižších otáčkách motoru.

5.2 DIESELGAS CNG

U systému Dieselgas CNG se může průměrná spotřeba nafty snížit až o 60 %. Tato úspora je poté nahrazena odpovídajícím množstvím plynného paliva. Celková spotřeba zemního plynu však může být o něco vyšší než objem uspořené nafty. Tento stav ale nastává většinou až při větší záměně paliv. CNG jako palivo je navíc zcela odlišné od motorové nafty. I přes to v režimu duálního paliva dochází k úspoře nákladů za pohonné hmoty [67].

Přestavbou na duální pohon prošel i tahač DAF XF 460 (obr. 19) plnicí normu Euro 6. Toto vozidlo bylo osazeno čtyřmi nádržemi CNG o celkovém objemu 320 litrů. Do těchto nádrží lze natankovat přibližně 55 kg CNG o jmenovitém plnicím tlaku 220 barů, odpovídající 75 litrům motorové nafty. Dojezd v duálním režimu se pak odvíjí hlavně na poměru záměny těchto dvou paliv a s tím spjatou spotřebu. Obecně se však pohybuje v rozmezí 400 až 600 km [67].



Obr. 19 DAF XF 460 Euro 6 Diesel + CNG [67]

Toto vozidlo v základním režimu dosahuje průměrné spotřeby nafty 28,5 až 30 l/100 km v závislosti na stylu jízdy. V duálním režimu NM+CNG se průměrná spotřeba pohybuje okolo 19,5 l/100 km + 8,9 kg/100 km. V tomto případě dochází až k 35% úspoře motorové nafty, která je nahrazena přibližně stejným množstvím CNG [67].

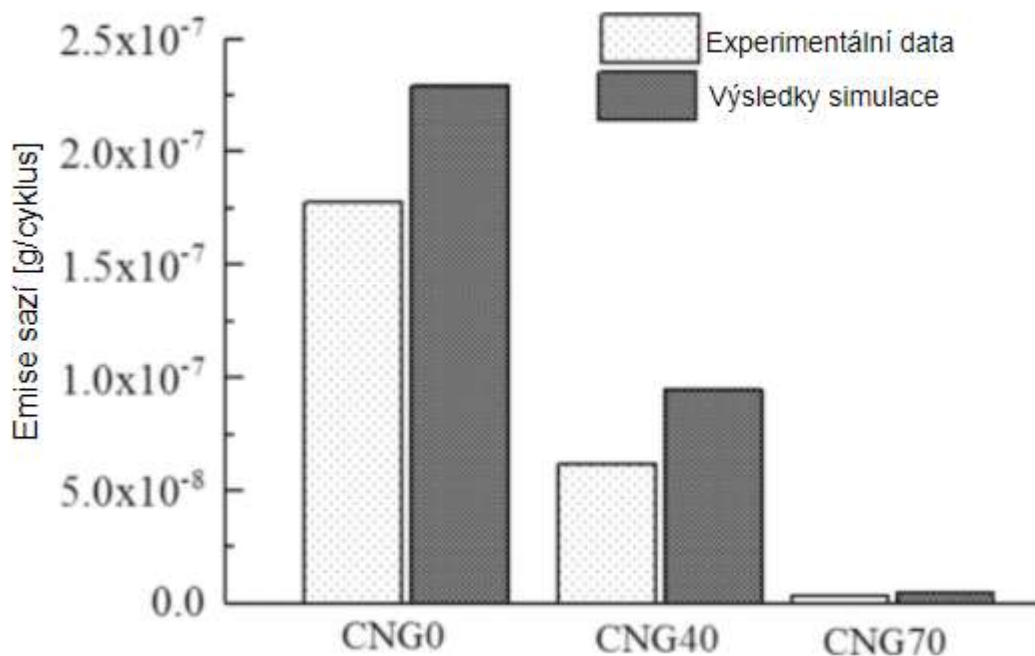
Spalování nafty a zemního plynu je také atraktivní z důvodu snižování emisí CO₂ a pevných částic. Se zvyšujícím se poměrem náhrady CNG se drasticky snižují emise sazí vznětového motoru. Tento fakt je zapříčiněn rovnoměrnější distribucí poměru paliva a vzduchu, díky tomu je směs více homogenní [68].

Na toto téma provedl Haigin Zhou v roce 2019 experiment se svými kolegy z pekingského technologického institutu. Experiment byl vykonán na jednoválcovém vznětovém motoru s označením AVL 5402, který byl upraven pro spalování směsi nafta+CNG. Pro vstřikování CNG byl použit systém SOLARIS CNG. Plyn byl vstřikován do sacího potrubí a jeho množství bylo regulováno pomocí kontrolního programu. Průtok CNG byl sledován pomocí hmotnostního průtokoměru. Průtok nafty byl měřen interním zařízením na spotřebu paliva. Při experimentu byl použit zemní plyn, který obsahoval 99 % metanu. Při experimentu se celkové zatížení motoru udržovalo stejné a jeho otáčky byly 1 200 ot/min. Byla provedena tři měření, při kterých se měnil poměr palivové směsi. Poměr paliv je shrnut v následující tabulce [68].

Tab. 9 Zkušební podmínky experimentu [68]

Zkušební podmínky	Palivo	Dávka motorové nafty
CNG0	100 % nafta	20 mg
CNG40	60 % nafta + 40 % metan	12 mg
CNG70	30 % nafta + 70 % metan	6 mg

Pro měření emisí byla využita standardní metoda filtračního papíru. Výsledky jsou shrnuty v následujícím grafu [68].



Obr. 20 Výsledky experimentu (upraveno) [68]

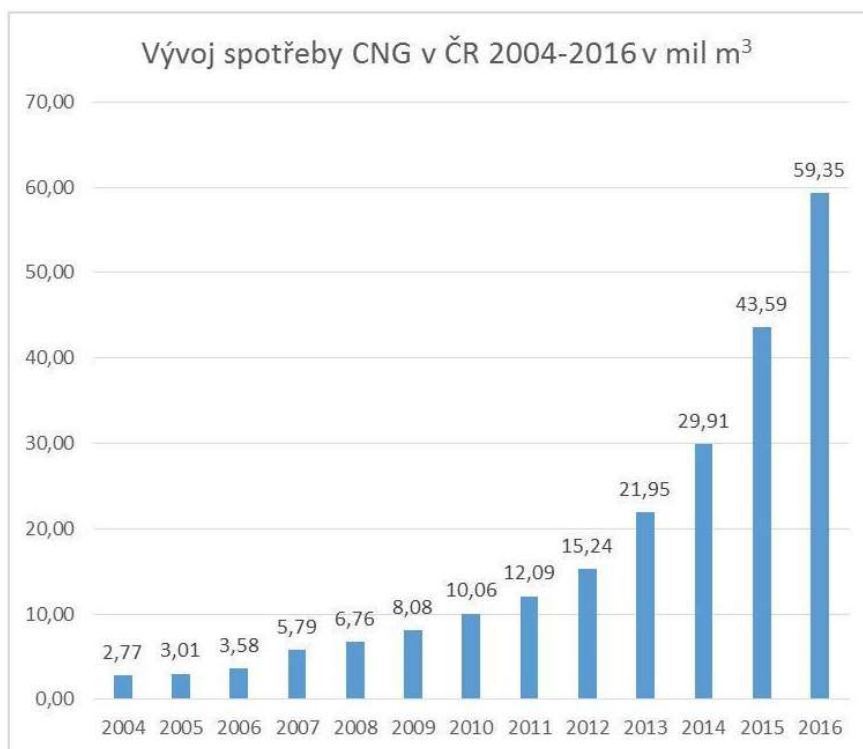
Graf srovnává data získaná z počítačové simulace s výsledky reálného měření. Při zvýšení dávky CNG se hmotnost sazí dramaticky sníží. Při použití 40 % metanu v palivové směsi došlo ke snížení hmotnosti emisí sazí o 65,1 % oproti standardnímu režimu se 100 % motorové nafty. Při použití 70 % metanu toto snížení dosahuje až 98 % [68].

ZÁVĚR

Pro využití plyných ve vznětových motorech je nejrozšířenější přestavba na duální pohon. V roce 2019 se na území České republiky nacházelo pouze 6 servisů se schválením ministerstva dopravy, které tuto přestavbu zajišťovali. Lze však očekávat, že postupem času se počet těchto servisů bude čím dál více zvětšovat. Systém Dieselgas má široké využití a je možno jej využít téměř u všech vozidel se vznětovým motorem. Nejvíce je však využíván u středně těžkých a těžkých nákladních vozidel. Často bývá tato přestavba realizována i u dodávkových automobilů s velkým nájezdem kilometrů (doručovací společnosti apod.). Systém se také využívá k pohonu strojů jako jsou traktory, kombajny, bagry, ale i lodě a lokomotivy. Výhodou u velkých nákladních vozidel je větší prostor pro instalaci nádrží na plynné palivo. Nejvíce se přestavba vyplatí dopravcům s velkými flotilami vozidel, protože náklady na přestavbu se nejrychleji vrátí právě u řidičů s velkým nájezdem kilometrů.

V případě přestavby Dieselgas LPG se cena pohybuje v rozmezí třicet až čtyřicet tisíc korun. U Dieselgas CNG se může částka za přestavbu vyšplhat až ke sto tisícům. U obou systémů jsou vozidla do dvanácti tun oproštěna od placení silniční daně, která u vozidel s větší tonáží tvoří nezanedbatelnou částku. Značnou výhodou u systému Dieselgas LPG je infrastruktura plnicích stanic, kterých je v České republice přibližně pětikrát více než stanic s CNG. U obou systémů se po instalaci dosahuje roční úspory 100 až 130 tisíc korun u jednoho vozidla. U dopravců s velkými vozovými parky tak mohou dosahovat úspory až milionů korun.

Systém je tak lákavý zejména díky finančním úsporám. Další výhodou je ekologický provoz vozidla, na který je v poslední době kladen čím dál větší důraz. Do budoucna bude pravděpodobně zvýhodňován systém Dieselgas CNG, protože CNG je na rozdíl od LPG součástí koncepce ministerstva dopravy České republiky pro rozvoj ekologických paliv.



Obr. 21 Vývoj spotřeby CNG v ČR [69]

Spotřeba stlačeného zemního plynu v České republice v posledních letech značně vzrostla (obr. 21) a s největší pravděpodobností bude dále růst.

CNG je celkově považováno za lepší alternativní palivo než LPG, protože produkce zemního plynu není závislá na těžbě ropy. V současnosti se mluví o možnosti těžby nekonvenčního zemního plynu z břidlic. Velká ložiska břidlicového plynu se nachází v Polsku, Německu, Rakousku a Francii. V následujících letech by mohly pokrýt velké procento spotřeby zemního plynu v celé Evropě. V budoucnu proto můžeme očekávat velký počet vozidel poháněných CNG, případně kombinací nafty a CNG. Společně s větším počtem vozidel lze očekávat i velký nárůst plnicích stanic tohoto plynu.

V budoucnu by se mohla v České republice objevit i kombinace nafta + LNG. Zkapalněný zemní plyn je postupně také na vzestupu a jeho síť plnicích stanic pomalu ale jistě roste. Hlavní výhodou oproti CNG je menší objem, který zkapalněný plyn zabírá. Zkapalněním zemního plynu dosáhneme třikrát menšího objemu než při jeho stlačení. Vozidla poháněná LNG tak zvládnou ujet téměř třikrát větší vzdálenost než vozidla s CNG nádrží stejné velikosti. Skladování LNG je však ekonomicky i technologicky náročné. V případě, že vozidlo delší dobu stojí a není v provozu, se plyn postupně odpařuje. Systém Dieselgas LNG by tak našel využití zejména v dálkové těžké dopravě, při které jsou vozidla téměř neustále v provozu.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] REMEK, Branko. *Automobil a spalovací motor: historický vývoj*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3538-2.
- [2] STONE, Richard. *Introduction to internal combustion engines*. 2012. ISBN 978-1-137-02829-7.
- [3] FERGUSON, Colin R. a Allan T. KIRKPATRICK. *Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences* [online]. New York, UNITED KINGDOM: John Wiley & Sons, Incorporated, 2015 [vid. 2021-02-12]. ISBN 978-1-118-92652-9. Dostupné z: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/vutbrno/detail.action?docID=4039918>
- [4] *Rudolf Diesel a jeho geniální vynález - Garáž.cz* [online]. [vid. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/rudolf-diesel-a-jeho-genialni-vynalez-21002623>
- [5] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. *Automobilová paliva*. Praha: Grada, 2005. ISBN 978-80-247-0350-3.
- [6] PROSTŘEDÍ, EnviWeb cz-zpravodajství o životním. Z historie využití plynu v dopravě - EnviWeb.czEnviWeb.cz. *EnviWeb.cz* [online]. [vid. 2021-02-22]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/75410>
- [7] diesel engine | Definition, Development, Types, & Facts. *Encyclopedia Britannica* [online]. [vid. 2021-02-22]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/diesel-engine>
- [8] Prodej dieselů je po třech dekáдах poprvé pod 30 procenty, roste elektro. *iDNES.cz* [online]. 3. září 2020 [vid. 2021-02-22]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/auto/zpravodajstvi/prodeje-aut-statistika-evropa-diesel-hybrid-plug-in-elektromobil.A200903_091103_automoto_fdv
- [9] *vznetový motor* [online]. [vid. 2021-02-22]. Dostupné z: <http://www.animfyzika.wz.cz/vznetovymotor.html>
- [10] *O motorech typu Common Rail* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/o-motorech-typu-common-rail.html>
- [11] What is Common Rail? *Farinia Group* [online]. 27. listopad 2014 [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.farinia.com/blog/what-common-rail>
- [12] *Technologies - Common Rail* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: https://www.railway-energy.org/static/Common_Rail_37.php
- [13] *Common-rail – autolexicon.net* [online]. [vid. 2021-02-25]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/common-rail/>
- [14] *What is Diesel Fuel* [online]. [vid. 2021-03-01]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/fuel_diesel.php

- [15] Nafta v ČR: druhy, skladování, rezervy a kauza Viktoriagruppe. *oEnergetice.cz* [online]. [vid. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/ropa/nafta/>
- [16] *Motorová nafta* [online]. 2020 [vid. 2021-03-01]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Motorov%C3%A1_nafta&oldid=19240395
- [17] ÚAMK, Redakce. *4 druhy nafty* [online]. [vid. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.uamk.cz/aktuality/2233-4-druhy-nafty>
- [18] ČSN EN 590 (656506) [online]. [vid. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/95061>
- [19] *Engine Efficiency* [online]. [vid. 2021-02-26]. Dostupné z: https://dieselnet.com/tech/engine_efficiency.php
- [20] *Diesel Vehicles* [online]. [vid. 2021-03-01]. Dostupné z: https://www.fueleconomy.gov/feg/di_diesels.shtml
- [21] *Diesel Engines - an overview | ScienceDirect Topics* [online]. [vid. 2021-03-01]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/diesel-engines>
- [22] PAVELEK, Milan, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, a FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. *Termomechanika*. Brno: CERM, 2003. ISBN 978-80-214-2409-8.
- [23] *Pracovní cykly spalovacích motorů.pdf* [online]. [vid. 2021-03-12]. Dostupné z: http://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/02_Silnicni-vozidla_4-6/4_IUT/017_Pracovni-cykly-spalovacich-motoru---P1.pdf
- [24] KALČÍK, Josef a Karel SÝKORA. *Technická termomechanika*. 1. vydání. Praha: Praha: Academia, 1973.
- [25] REŞİTOĞLU, İbrahim Aslan, Kemal ALTINIŞIK a Ali KESKIN. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems. *Clean Technologies and Environmental Policy* [online]. 2015, 17(1), 15–27. ISSN 1618-9558. Dostupné z: doi:10.1007/s10098-014-0793-9
- [26] ŠMERDA, Tomáš, Jiří ČUPERA a Martin FAJMAN. *Vznětové motory vozidel: biopaliva, emise, traktory*. Brno: CPress, 2013. ISBN 978-80-264-0160-5.
- [27] *oxid uhelnatý* [online]. [vid. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://arnika.org/oxid-uhelnaty>
- [28] *Součinitel přebytku vzduchu* [online]. 2015 [vid. 2021-03-15]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Sou%C4%8Dinitel_p%C5%99ebytku_vzduchu&oldid=12575566
- [29] *Emise výfukových plynů – autolexicon.net* [online]. [vid. 2021-03-15]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/emise-vyfukovych-plynu/>
- [30] *Plynná paliva.pdf* [online]. [vid. 2021-03-21]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-619-2/pdf/251.pdf

- [31] SYNÁK, František, Kristián ČULÍK, Vladimír RIEVAJ a Ján GAŇA. Liquefied petroleum gas as an alternative fuel. *Transportation Research Procedia* [online]. 2019, **40**, TRANSCOM 2019 13th International Scientific Conference on Sustainable, Modern and Safe Transport, 527–534. ISSN 2352-1465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2019.07.076
- [32] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2004. ISBN 978-80-239-1602-7.
- [33] SZKANDERA, Michal Pour, Matej Nuhlicek, Patrik. *LPG stanice v ČR - mapa | Levné LPG* [online]. [vid. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.levnelpg.cz/lpg-stanice/>
- [34] *Brno - Cena LPG* [online]. [vid. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.mbenzin.cz/Ceny-LPG/Brno>
- [35] *LPG (Liquefied Petroleum Gas) | Glossary | Oiltanking* [online]. [vid. 2021-03-24]. Dostupné z: <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/details/term/lpg-liquefied-petroleum-gas.html>
- [36] KRZYSZTOF BIERNAT. *Alternative Fuels, Technical and Environmental Conditions*. [online]. 2016 [vid. 2021-03-29]. ISBN 978-953-51-2269-2. Dostupné z: <https://www.doabooks.org/doab?func=fulltext&rid=36523>
- [37] *ČSN EN 589 (656503)* [online]. [vid. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://shop.normy.biz/detail/508150>
- [38] KHAN, Muhammad Imran, Tabassum YASMIN a Abdul SHAKOOR. Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **51**, 785–797. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.053>
- [39] *Liquefied Petroleum Gas (LPG), Liquefied Natural Gas (LNG) and Compressed Natural Gas (CNG)* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: http://www.envocare.co.uk/lpg_lng_cng.htm
- [40] KAZMI, S Kamal. CNG. *Pakistan & Gulf Economist*. 2012, **31**(50), 48–49. ISSN 02531941.
- [41] Bezpečnost. *CNG+* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.cngplus.cz/o-cng/bezpecnost.html>
- [42] Zájem o auta na CNG stále roste, zvýšil se i počet | Novinky. *CNG+* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.cngplus.cz/novinky/zajem-o-auta-na-cng-stale-roste-zvysil-se-i-pocet-plnicich-stanic.html>
- [43] Alternativní paliva motorových vozidel a potenciál jejich požáru a výbuchu. *TZB-info* [online]. [vid. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/21570-alternativni-paliva-motorovych-vozidel-a-potencial-jejich-pozaru-a-vybuchu>

- [44] *Autobusy | CNG4You* [online]. [vid. 2021-04-04]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/vozidla/autobusy.html>
- [45] SINYAVSKII, V. V., S. N. BOGDANOV, I. V. ALEKSEEV a Yu. S. FADDEIKINA. Conversion of Diesel Engines to a Gas and Gas–Diesel Cycle. *Russian Engineering Research* [online]. 2019, **39**(8), 713–716. ISSN 1934-8088. Dostupné z: doi:10.3103/S1068798X19080185
- [46] *Drahý benzin a nafta nutí k hledání alternativ. Řešení pro naftové motory nabízí systém Dieselgas | Protex - PR služby ČTK* [online]. [vid. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.protex.cz/zprava.php?id=21620>
- [47] Omnitek develops diesel-to-natural gas engine conversion kits for Mercedes OM904/OM906. *Green Car Congress* [online]. [vid. 2021-04-05]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2012/04/omnitek-20120419.html>
- [48] *Diesel Gas CNG versus CNG-proč je duální pohon dieselu lepší* [online]. [vid. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://www.diesel-gas.cz/diesel-gas-cng-versus-cng/>
- [49] *Jak funguje dieselgas a co to je zjistěte více na diesel-gas.cz* [online]. [vid. 2021-04-11]. Dostupné z: <http://www.diesel-gas.cz/funkce-dieselgas/>
- [50] *Diesel displacement.pdf* [online]. [vid. 2021-04-11]. Dostupné z: http://efdsystems.org/pdf/White_Paper_2014-5-01_Diesel_Displacement_final.pdf
- [51] *Dieselgas* [online]. [vid. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.luckygas.cz/page/dieselgas/17>
- [52] Dieselgas. *Gasinsight.cz* [online]. [vid. 2021-04-12]. Dostupné z: <http://www.gasinsight.cz/dieselgas/>
- [53] TIWARI, Abhay. *Converting a Diesel Engine to Dual-Fuel Engine Using Natural Gas* [online]. 2015. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.29781.93926
- [54] *Diesel Gas CNG* [online]. [vid. 2021-05-05]. Dostupné z: <http://www.diesel-gas.cz/diesel-gas-cng/>
- [55] ASHOK, B., S. Denis ASHOK a C. Ramesh KUMAR. LPG diesel dual fuel engine – A critical review. *Alexandria Engineering Journal* [online]. 2015, **54**(2), 105–126. ISSN 1110-0168. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.03.002>
- [56] *Diesel Gas | lpgprofi.cz* [online]. [vid. 2021-04-12]. Dostupné z: <https://www.lpgprofi.cz/dieselgas>
- [57] *Výkon motoru na duální palivo Dieselgas | diesel-gas.cz* [online]. [vid. 2021-04-19]. Dostupné z: <http://www.diesel-gas.cz/vykon-motoru-dieselgas/>
- [58] *Přestavba na DieselGas LPG/CNG | FEDOR Auto* [online]. [vid. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.fedorauto.cz/dieselgas-lpg-cng.html>

- [59] Montáž Diesel CNG - duálního pohonu na naftu a CNG. *diesel-cng.cz* [online]. [vid. 2021-05-06]. Dostupné z: <http://diesel-cng.cz/montaz-diesel-cng/>
- [60] *Reduktor CNG od profesionálů na lpgprofi.cz* [online]. [vid. 2021-05-06]. Dostupné z: <https://www.lpgprofi.cz/reduktory-cng>
- [61] VOLVO FH 500 Diesel CNG nádrže za kabinou. *diesel-cng.cz* [online]. 24. březen 2021 [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://diesel-cng.cz/volvo-fh-500-diesel-cng-nadrze-kabina/>
- [62] Scania R 450 Diesel CNG duální pohon nafta a CNG od firmy Gasinsight. *diesel-cng.cz* [online]. 19. listopad 2020 [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://diesel-cng.cz/scania-r450-diesel-cng/>
- [63] Přestavba diesel na LPG s duálním palivovým systémem. *Přestavba na LPG* [online]. [vid. 2021-05-08]. Dostupné z: <http://www.prestavbanalpg.cz/prestavba-diesel-cng-lpg/>
- [64] *Jaká může být úspora PHM se systémem Solaris Diesel?* [online]. [vid. 2021-05-10]. Dostupné z: <http://www.diesel-gas.cz/uspورا-phm-diesel-gas/>
- [65] *Raport-CO2-Politechnika-Poznańska-EN.pdf* [online]. [vid. 2021-05-10]. Dostupné z: <http://www.diesel-gas.cz/wp-content/uploads/2014/09/Raport-CO2-Politechnika-Pozna%C5%84ska-EN.pdf>
- [66] *Emise CO2 jsou s Dieselgas LPG nižší oficiálně prokázáno! | DIESELGAS* [online]. [vid. 2021-05-11]. Dostupné z: <http://www.diesel-gas.cz/nizsi-emise-diesel-gas/>
- [67] *DAF XF 460 Euro 6 Diesel-CNG | DIESELGAS* [online]. [vid. 2021-05-11]. Dostupné z: <http://www.diesel-gas.cz/daf-xf-460-euro-6-diesel-cng/>
- [68] ZHOU, Haiqin, Xiangrong LI a Chia-Fon F. LEE. Investigation on soot emissions from diesel-CNG dual-fuel. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2019, **44**(18), 9438–9449. ISSN 0360-3199. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.012](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.02.012)
- [69] *CNG u nás není na ústupu, jeho spotřeba v Česku byla opět rekordní* [online]. [vid. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/aktuality/cng-u-nas-neni-na-ustupu-jeho-spotreba-v-cesku-byla-opet-rekordni.html>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

<i>CAN</i>		Controller Area Network (datová sběrnice)
<i>CNG</i>		Compressed natural gas (stlačený zemní plyn)
<i>CO</i>		Oxid uhelnatý
<i>CO₂</i>		Oxid uhličitý
<i>c_p</i>	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku
<i>c_v</i>	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Měrná tepelná kapacita za konstantního objemu
<i>ECU</i>		Electronic control unit (elektronická řídicí jednotka)
<i>EGT</i>		Exhaust gas temperature (teplota výfukových plynů)
<i>H₂O</i>		Vodní pára
<i>HC</i>		Hydrocarbons (nespálené uhlovodíky)
<i>CH₄</i>		Metan
<i>LNG</i>		Liquefied natural gas (zkapalněný zemní plyn)
<i>LPG</i>		Liquefied petroleum gas (zkapalněná propan-butanová směs)
<i>m</i>	[kg]	Hmotnost
<i>N₂</i>		Dusík
<i>N₂O</i>		Oxid dusný
<i>NM</i>		Motorová nafta
<i>NMHC</i>		Non-methane hydrocarbons (nespálené uhlovodíky)
<i>NO</i>		Oxid dusnatý
<i>NO₂</i>		Oxid dusičitý
<i>NO_x</i>		Oxidy dusíku
<i>O₂</i>		Kyslík
<i>OČVM</i>		Oktanové číslo výzkumnou metodou
<i>p₂</i>	[Pa]	Tlak v charakteristickém bodu cyklu 2
<i>p₃</i>	[Pa]	Tlak v charakteristickém bodu cyklu 3
<i>PHM</i>		Pohonné hmoty
<i>PM</i>		Particulate matter (pevné částice)
<i>ppm</i>		Parts per million (miliontina množství)
<i>PT</i>		Platina
<i>Q_C</i>	[J]	Teplo přivedené
<i>Q_H</i>	[J]	Teplo odvedené
<i>Q_{Hp}</i>	[J]	Teplo přivedené za konstantního tlaku

Q_{Hv}	[J]	Teplo přivezené za konstantního objemu
T_1	[K]	Teplota v charakteristickém bodu cyklu 1
T_2	[K]	Teplota v charakteristickém bodu cyklu 2
T_3	[K]	Teplota v charakteristickém bodu cyklu 3
T_4	[K]	Teplota v charakteristickém bodu cyklu 4
T_5	[K]	Teplota v charakteristickém bodu cyklu 5
V_1	[m ³]	Objem v charakteristickém bodu cyklu 1
V_2	[m ³]	Objem v charakteristickém bodu cyklu 2
V_3	[m ³]	Objem v charakteristickém bodu cyklu 3
V_4	[m ³]	Objem v charakteristickém bodu cyklu 4
ε	[-]	Kompresní poměr
η_t	[-]	Termická účinnost
κ	[-]	Poissonova konstanta
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu
φ	[-]	Stupeň plnění
ψ	[-]	Stupeň zvýšení tlaku