



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

PLYNNÁ PALIVA PRO ZÁŽEHOVÉ MOTORY

GASEOUS FUELS FOR SI ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Zdeněk Příbyl

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Zdeněk Příbyl
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:

Plynná paliva pro zážehové motory

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jednou z cest snižování emisí včetně CO₂ je používání alternativních paliv včetně plyných. U motorových vozidel se používají jako jedna z možností zážehové motory, které pro svůj provoz potřebují lehce odpařitelná paliva nebo plyná paliva. Plyná paliva mají své místo jak u původně zážehových motorů, tak i u přestavěných vznětových motorů.

Cíle bakalářské práce:

Přehled možných plyných paliv vhodných pro zážehové motory. Shrnutí vlastností paliv, které ovlivňují děje při spalování v zážehovém motoru a mají vliv na jeho konstrukční díly. Popsat výhody a nevýhody paliv. Popis infrastruktury potřebné pro distribuci a tankování plyných paliv. Nádrže pro plyná paliva. Pro vybrané plyné palivo provést porovnání spalování s běžným benzínem. 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.

LEE, S., SPEIGHT J. G. a LOYALKA S. K. Handbook of alternative fuel technologies. 1. Boca Raton: CRC Press, c2007. ISBN 978-0-8247-4069-6.

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.

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

V bakalářské práci je zhotoven přehled alternativních plyných paliv pro zážehové spalovací motory. U těchto paliv jsou uvedené jejich vlastnosti a výroba, nejdůležitější komponenty vozidel, infrastruktura čerpacích stanic. U jednotlivých paliv jsou zhodnoceny jejich vlastnosti a parametry. U CNG je provedeno srovnání s naftou. V závěru této bakalářské práce je naznačeno využití plyných paliv v budoucnu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Alternativní paliva, LPG, vodík, CNG, LNG

ABSTRACT

In this bachelor thesis is processed a survey of alternative gaseous fuels for spark-ignition combustion engines. The properties and production, the most important components, infrastructure of service station of specific fuel are stated for these fuels. There are defined the advantages and disadvantages of each fuel. The comparison of CNG and diesel is made. The use of alternative gaseous in the future is outlined at the end of this bachelor thesis.

KEYWORDS

Alternative fuels, LPG, hydrogen, CNG, LNG

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PŘIBYL, Z. *Plynná paliva pro zážehové motory*. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 49 s. Vedoucí bakalářské 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

.....

Zdeněk Příbyl

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za výstižné připomínky, cenné rady, ochotu a trpělivost při vypracování mé bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	11
1 LPG	12
1.1 Vlastnosti LPG	12
1.2 Plnicí stanice v České republice	14
1.3 Technické řešení vozidel na LPG	14
1.3.1 Přestavba na LPG	14
1.3.2 Komponenty systému na LPG	20
1.4 Motorová vozidla poháněná LPG	22
1.5 Hodnocení LPG	22
1.5.1 Výhody	22
1.5.2 Nevýhody	22
2 Vodík	23
2.1 Vlastnosti vodíku	23
2.2 Plnicí stanice	24
2.3 Výroba vodíku	24
2.3.1 Parní reformování	24
2.3.2 Zplyňování biomasy	25
2.3.3 Elektrolýza	26
2.3.4 Vysokoteplotní elektrolýza	26
2.3.5 Pyrolýza	27
2.3.6 Další způsoby výroby	27
2.4 Skladování vodíku	27
2.4.1 Skladování plynného vodíku	27
2.4.2 Skladování kapalného vodíku	28
2.4.3 Další způsoby skladování	28
2.5 Motorová vozidla poháněná vodíkem	29
2.6 Hodnocení vodíku	29
2.6.1 Výhody	29
2.6.2 Nevýhody	30
3 CNG, LNG	31
3.1 Vlastnosti CNG a LNG	31
3.2 Plnicí stanice v České republice	32
3.3 Technické řešení vozidel na CNG	33
3.3.1 Přestavba na CNG systémy	33
3.3.2 Komponenty systému CNG	33
3.4 Motorová vozidla poháněná CNG	34
3.5 Hodnocení CNG	34
3.5.1 Výhody	35
3.5.2 Nevýhody	35
4 Porovnání CNG a Nafty	36
4.1 Vozidla	36
4.2 Srovnání	36
4.3 Zhodnocení	37

Závěr	40
Seznam použitých zkratek a symbolů	47
Seznam příloh	49

ÚVOD

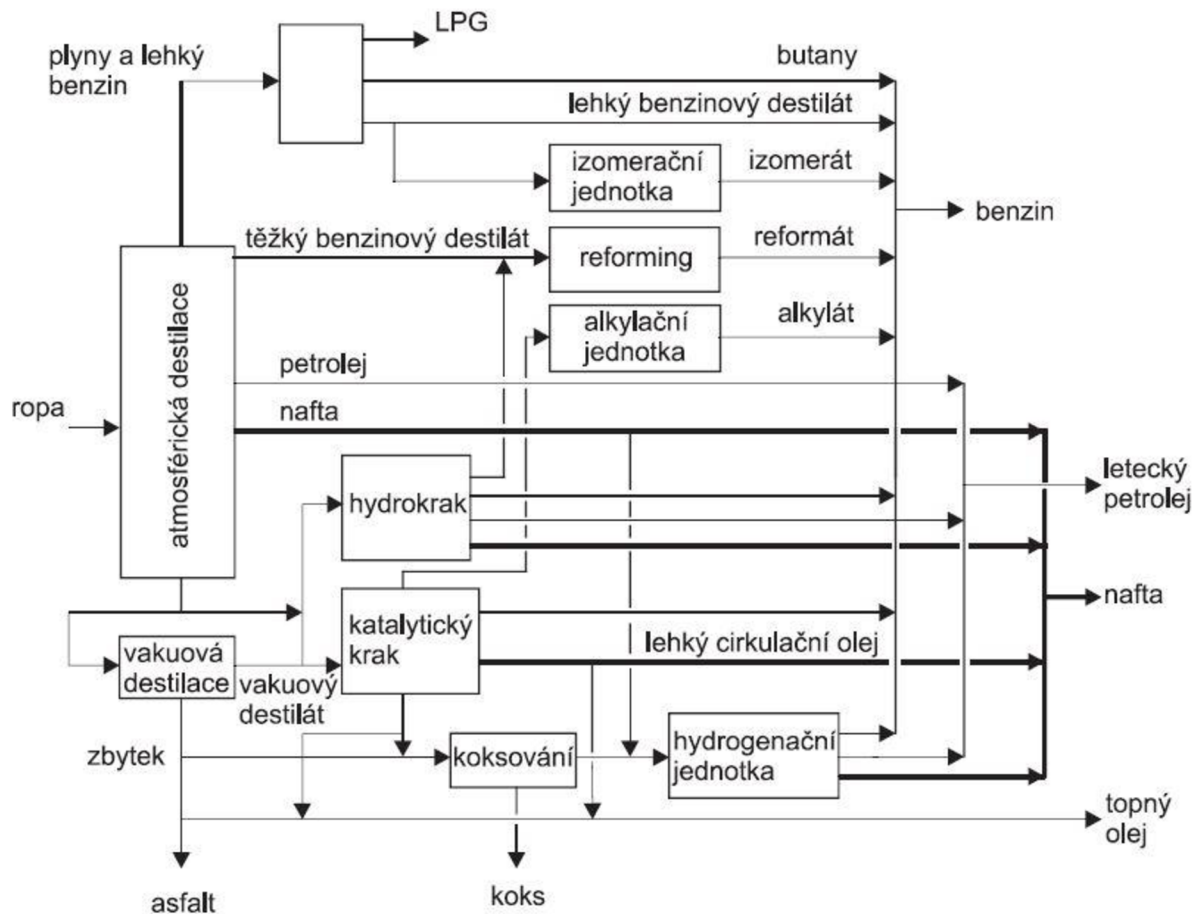
Už dlouhou dobu se lidé zabývají náhradou klasických fosilních paliv, jako jsou benzín a nafta alternativními palivy. V budoucnu hrozí nebezpečí vyčerpání všech dostupných ložisek ropy. Tyto ložiska jsou potřebná nejen pro pohon automobilů, ale i pro výrobu plastů, hnojiv, pesticidů a léků. Toto nebezpečí nás nutí hledat řešení daného problému. Navíc vozidla poháněná benzínem nebo naftou produkují velké množství škodlivých látek (CO_2 , NO_x), které napomáhají vzniku skleníkového efektu a mají za následek globální oteplování. Alternativní paliva by měla mít minimální emise těchto škodlivých látek. Dalším důvodem hledání alternativních paliv je rostoucí cena ropy, což motoristy vede k zamyšlení nad přechodem na alternativní palivo.

V první části své bakalářské práce se zabývám alternativními palivy pro zážehové spalovací motory a následnému srovnání CNG s naftou. Pozornost věnuji nejrozšířenějším, nejekologičtějším a nejperspektivnějším palivům – LPG, Vodík, CNG a LNG. Popisuji jejich vlastnosti, způsob výroby, možnosti přestavby vozidel, nejdůležitější komponenty, infrastrukturu čerpacích stanic. Kriticky hodnotím vybraná paliva, stanovuji výhody a nevýhody těchto paliv.

V druhé části provádím srovnání paliva CNG s naftou pomocí MATLAB[®] skriptu a hodnotím získaná data.

1 LPG

Jedná se o zkapalněný ropný plyn (**Liquefied Petroleum Gas**). Hlavní složky jsou propan (C_3H_8) a butan (C_4H_{10}), dále může LPG obsahovat malé podíly dalších uhlovodíků jako např. ethan (C_2H_6), pentan (C_5H_{12}), buten (C_4H_8), penten (C_5H_{10}) a sloučeniny síry. Produkce LPG je limitována světovými zásobami ropy, protože zkapalněný ropný plyn získáváme zpracováním ropy v rafineriích jako vedlejší produkt – obr. 1 [13].



Obr. 1 Zjednodušené schéma destilace a zpracování frakcí ropy [1]- str. 44

V České republice je k roku 2020 vybudováno 1 337 LPG čerpacích stanic [14]. V roce 2020 bylo v České republice registrováno 1 280 nových LPG vozidel [15] a dalších 4 000 vozidel bylo přestavěno na spalování LPG [16]. Celkový počet LPG vozidel přesahuje 250 tisíc.

1.1 VLASTNOSTI LPG

LPG je hořlavá těkavá látka, která má specifický zápach. V normálních podmínkách je LPG v plynném stavu. Plyn je nejedovatý a nedýchátný a je těžší než vzduch [17]. Do kapalného stavu LPG snadno převedeme stlačením nebo ochlazením. V kapalném stavu zaujímá 1/250 plynného objemu. Výhodou je snadný přechod mezi skupenskými stavy, protože nám umožňuje skladování velkého množství energie [18].

Propan a butan se při styku s vodou odpařuje. Díky tomuto nedochází ke znečištění podzemních ani povrchových vod. Obsahuje minimální množství síry, proto při spalování nevytváří tolik škodlivin a nezatěžuje ovzduší jako benzín. LPG má lepší antidetonační vlastnosti, ale jeho objemová výhřevnost je menší než u benzínu. Při nezměněném kompresním poměru toto způsobuje pokles výkonu motoru až o 10 %. Při teplotě 20 °C dojde ke zkapalnění propanu při tlaku 0,85 MPa a butanu při 0,23 MPa [1].

Od 1. 4. do 1. 11. se v České republice prodává tzv. letní směs, která obsahuje 40 % propanu a 60 % butanu. Zimní směs obsahuje 60 % propanu a 40 % butanu [19].

Tab. 1 Vlastnosti propanu a butanu [68]

Vlastnost	Propan	Butan	Jednotka
Vzorec	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	[-]
Molární hmotnost	44,1	58,12	[g/mol]
Obsah uhlíku	81,80	82,76	[% hm.]
Kapalný stav			
Hustota při 20° C	502	579	[kg/m ³]
Teplota tání při tlaku 101,08 kPa	-189	-135	[°C]
Teplota varu při tlaku 101,08 kPa	-42,6	-0,6	[°C]
Plynný stav			
Hustota při tlaku 101,08 kPa	2,019	2,703	[kg/m ³]
Výhřevnost při 0° C	92,989	123,76	[MJ/m ³]
Bod zápalnosti	510	490	[°C]

Srovnání propanu, butanu a benzínu je uvedeno v tab. 2.

Tab. 2 Porovnání vlastností propanu, butanu a benzínu [1]– str. 32

Vlastnost	Propan	Butan	Benzín	Jednotka
Hustota při 15 °C	508	584	730 až 780	[kg/m ³]
Tlak par při 37 °C	1 210	260	50 až 90	[kPa]
Teplota varu	-42,6	-0,6	30 až 225	[°C]
Oktanové číslo	97	89	85 až 87	[-]
Výhřevnost hmotnostní	46,37	45,78	44,03	[MJ/kg]
Výhřevnost objemová	23,28	26,51	32,3	[MJ/dm ³]

Vlastnosti LPG by měly vyhovovat normě ČSN EN 589. Oktanové číslo závisí na poměru propanu a butanu ve směsi.

OKTANOVÉ ČÍSLO

Oktanové číslo je přímý jakostní parametr benzínu. Vyjadřuje jeho antidetonační schopnost (mohutnost), což znamená odolnost benzínu proti detonačnímu spalování (klepání motoru). Čím je oktanové číslo vyšší, tím je lepší odolnost benzínu vůči klepání. Oktanové číslo určitého automobilního benzínu se zjišťuje dvěma způsoby, takzvaně výzkumnou metodou a motorovou metodou. Stejně palivo zkoušené oběma metodami dává stejné výsledky jen za určitých podmínek. Zpravidla je oktanové číslo zjištěné výzkumnou metodou větší než číslo stanovené motorovou metodou [20] – citace str. 133.

1.2 PLNÍCÍ STANICE V ČESKÉ REPUBLICE

V České republice je vybudováno 1 337 čerpacích LPG stanic [14], což odpovídá víc než čtvrtině celkového počtu čerpacích stanic. Nejčastěji se vyskytují v blízkosti čerpacích stanic na fosilní paliva (benzín, nafta). Plnicí přípojku může připojit a odpojit pouze obsluha čerpací stanice nebo řádně proškolená osoba [21]. LPG se v čerpací stanici nachází v nádržích v kapalném stavu a přes výdejní stojan se tankuje do nádrží vozidel.

1.3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ VOZIDEL NA LPG

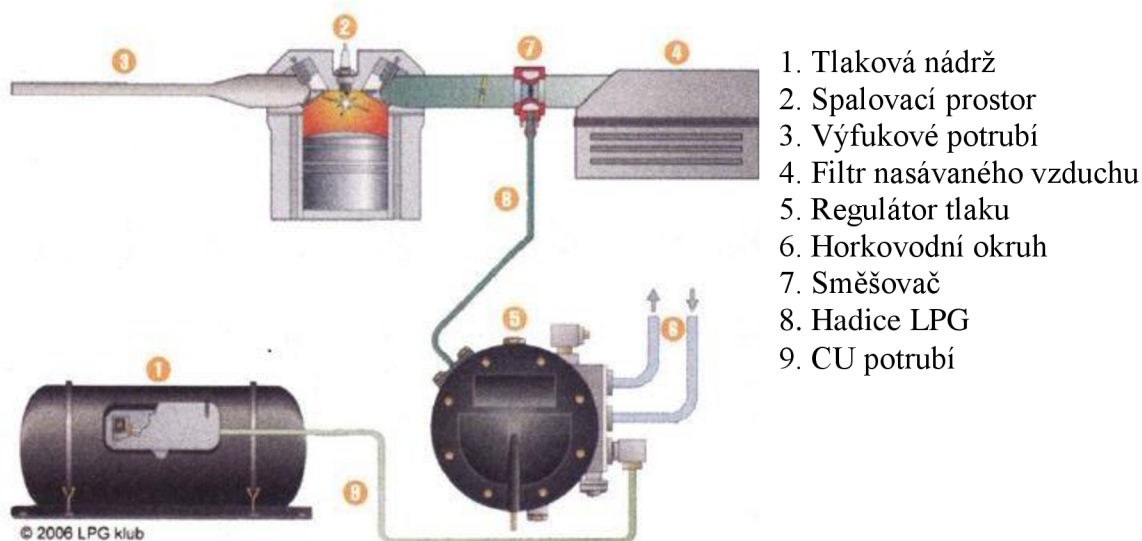
1.3.1 PŘESTAVBA NA LPG

V České republice se používá několik LPG systémů. Každý používáme pro jiný druh motoru. Zvolením správného systému ovlivňujeme bezporuchovost provozu vozidla. Pokud dojde k úpravě zážehového motoru, lze s tímto vozidlem nadále používat automobilový benzín, tím získáme dvoupalcové vozidlo (bifuel vehicle). Vznětové motory tuto výhodu postrádají, jedná se o jednopalivové vozidlo (monofuel vehicle).

SYSTÉM LPG S CENTRÁLNÍM SMĚŠOVAČEM

Jedná se o systém, který používala velmi stará vozidla s karburátorem – např. Škoda 120 [22]. Dnes již tento systém téměř vymizel, protože už je v provozu minimální množství takovýchto vozidel. Systém je ovládán podtlakovou hadicí, která byla zapojena na jedné straně do sacího potrubí a na druhé straně do reduktoru tlaku. Manuální přepínač, který umožňuje výběr paliva, které se přivádí do spalovací komory, má tři polohy. Tyto polohy umožňují jízdu pouze na benzín, pouze na plyn a střední poloha umožňuje vyjetí zbytkového benzínu v karburátoru. Seřízení se provádí nastavení maximálních emisních hodnot na emisním přístroji [23]. V České republice jsou schváleny systémy BRC, Emmegas, Lovato, Lovtec, Marini a Tartarini [22].

Výhodou tohoto systému je jeho snadná instalace, cenová dostupnost a nízká náročnost údržby. Nevýhodou je jeho zastaralost, nutnost manuálního přepínání paliva a vyšší spotřeba LPG.

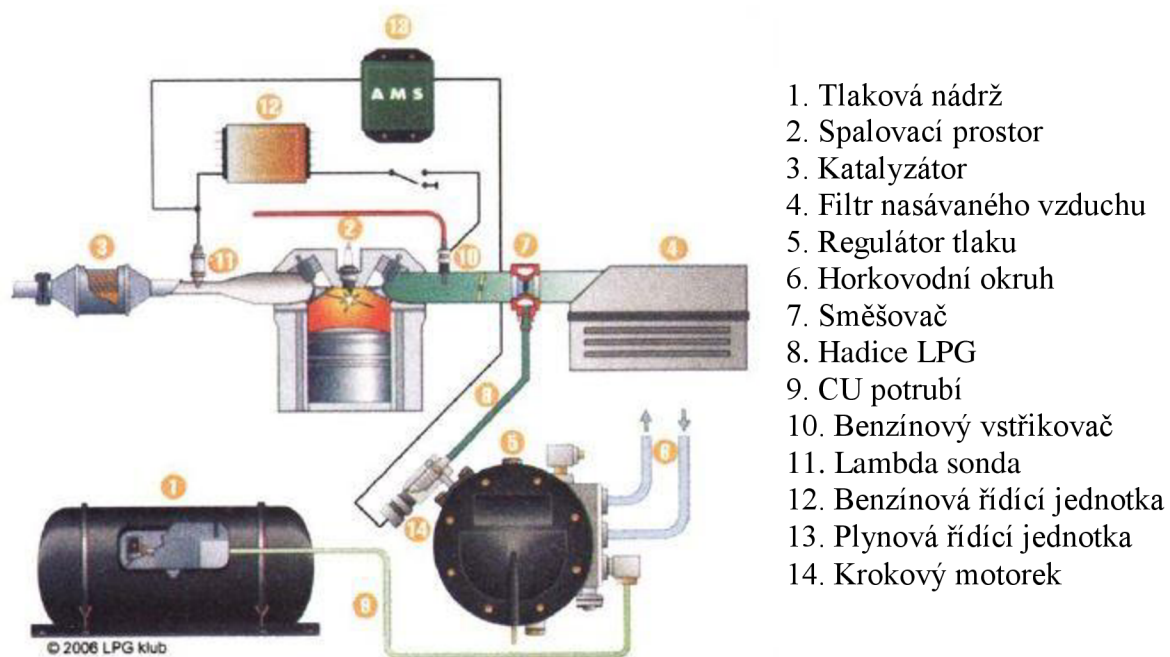


Obr. 2 Schéma systému s centrálním směšovačem [22]

SYSTÉM LPG S CENTRÁLNÍM SMĚŠOVAČEM ŘÍZENÝ LAMBDA SONDOU

Tento systém je velmi podobný předešlému systému. Je určený pro vozidla, která používají jednobodové nebo vícebodové vstřikování – např. Škoda Felicia 1,3 MPI [22]. Lambda sonda řídí dávkování paliva. Výběr paliva, které je přiváděno do spalovací komory, je umožněn manuálním přepínačem se třemi polohami, které jsou stejné jako u systému s centrálním směšovačem. Tyto systémy jsou také zastaralé a jsou nahrazovány dokonalejšími systémy, například systém se sekvenčním vstřikováním [23]. V České republice jsou schváleny systémy BRC, Emmegas, Lovato, Lovtec a Tartarini [22].

Výhodou tohoto systému je jeho nízká cena, snadná instalace a nízká náročnost údržby. Také má nižší spotřebu a vyšší výkon než předešlý systém. Nevýhodou je opět jeho zastaralost a stále vyšší spotřeba než mají vyspělé systémy.

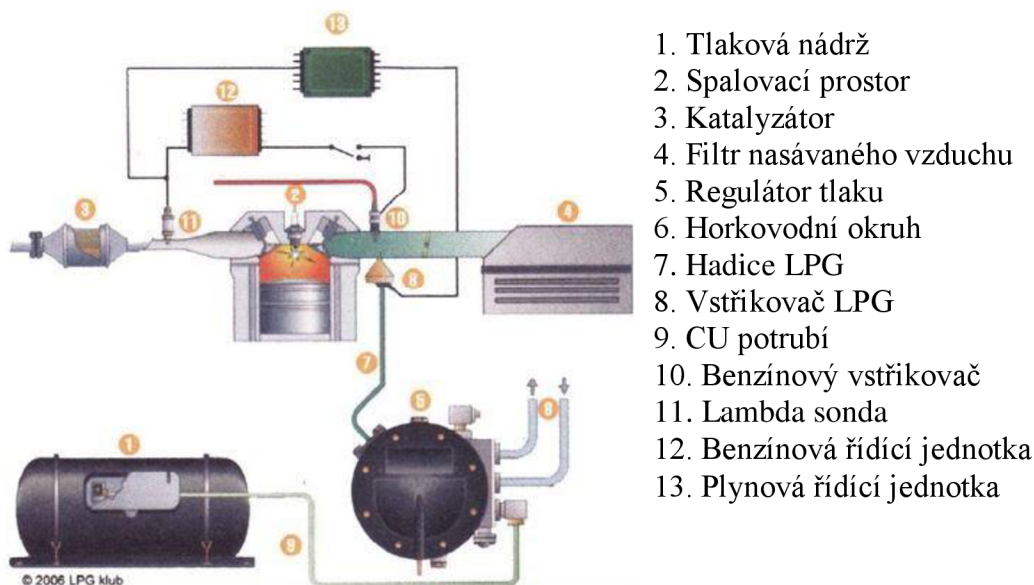


Obr. 3 Schéma systému s centrálním směšovačem řízený lambda sondou [22]

SYSTÉM LPG KONTINUÁLNÍHO VYSTŘIKOVÁNÍ

Také se označuje jako paralelní systém, protože benzínová a plynová řídicí jednotka je zapojena paralelně. Tento systém je už nyní také zastaralý, protože je určen pouze pro vozidla s vícebodovým vstřikováním, která nemají systémy palubní diagnostiky EOBD (**E**uropean **O**n **B**oard **D**iagnostic) a OBD II (**O**n **B**oard **D**iagnostic), což jsou vozidla do roku výroby 2001 [22]. Palivo je dodáváno do každého válce zvlášť. Dodávání je řízeno lambda sondou. Díky tomuto způsobu systém dosahuje vyšších výkonů než systémy s centrálním směšovačem a také odpadá možnost vzniku zpětného šlehnutí. V České republice jsou schváleny systémy AG, Autogas systems, BRC, Landi Renzo, Lovato, Lovtec a Tartarini [22].

Tento systém dosahuje vyšších výkonů než předešlé systémy a splňuje přísnější emisní normy. Nevýhody jsou jeho zastaralost, vyšší cena a omezené využití.

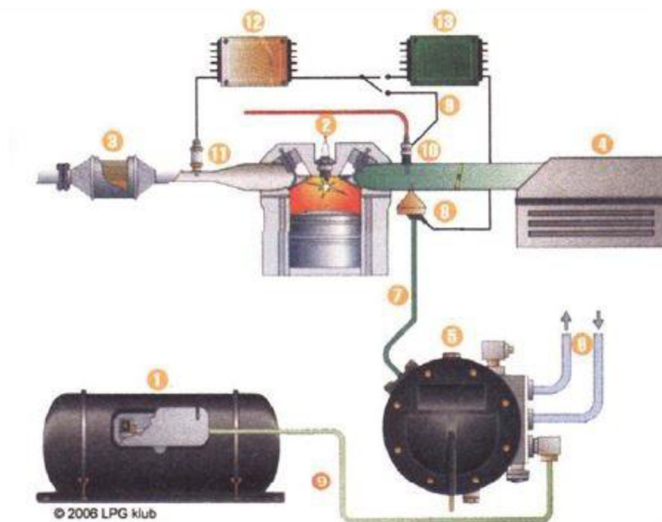


Obr. 4 Schéma systému kontinuálního vstřikování [22]

SYSTÉM LPG SEKVENČNÍHO VSTŘIKOVÁNÍ SGI

Také se označuje jako sériový systém, protože benzínová a plynová řídicí jednotka je zapojena sériově. Jedná se o moderní komplexní systém řízený elektronikou, který je určen pro vozidla s vícebodovým vstřikováním, která mají systémy palubní charakteristiky EOBD a OBD II [22]. Systém dávkuje palivo pro každý válec zvlášť. Dávkování je řízeno benzínovou jednotkou. Tento systém nepotřebuje lambda sondu. Množství plynu, které je dodáváno do válce místo benzínu, je řízeno plynovou řídicí jednotkou. U tohoto systému nedochází ke zpětnému šlehnutí. Benzín se obvykle používá pro studené starty, po dosažení provozních teplot dojde k přivádění LPG [24]. Výběr paliva, které je přiváděno do spalovací komory, určuje řídicí jednotka bez zásahu řidiče. Pokud dojde LPG, systém se sám přepne zpět na benzín [26]. V České republice jsou schváleny systémy AG, Autogas systems, KME, BRC, Landi Renzo, Lovato, Tartarini [22].

Výhodou tohoto systému je získaný výkon, který je srovnatelný s použitím fosilních paliv, a také možnost instalace na širokou škálu motorů. Tyto systémy také splňují emisní normu EURO IV. Nevýhodou je jeho vyšší pořizovací cena.



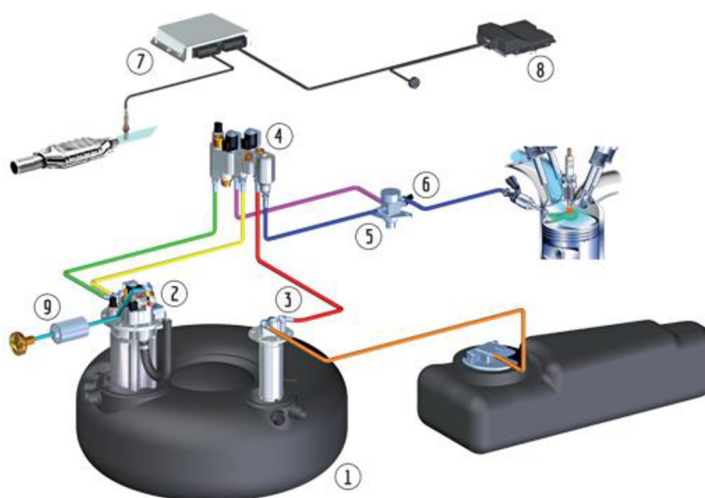
1. Tlaková nádrž
2. Spalovací prostor
3. Katalyzátor
4. Filtr nasávaného vzduchu
5. Regulátor tlaku
6. Horkovodní okruh
7. Hadice LPG
8. Vstřikovač LPG
9. CU potrubí
10. Benzínový vstřikovač
11. Lambda sonda
12. Benzínová řídicí jednotka
13. Plynová řídicí jednotka

Obr. 5 Schéma systému sekvenčního vstřikování SGI [22]

SYSTÉM LPG DIRECT INJECTION

Tento systém je určený pro motory TSI, FSI, TFSI, GDI, DISi, Tce a Eco Bost, které mají přímé vstřikování benzínu [23]. Jedná se o modernější verzi systému sekvenčního vstřikování. U tohoto systému dochází ke spotřebě benzínu, protože je potřeba chladit benzínové vstřikovače, které jsou umístěny ve spalovacím prostoru. V České republice jsou schváleny systémy BRC, Lovato, Landi Renzo, Zavoli, AC Stag [26].

Tento systém umožňuje získat vyšší výkon při nízkých otáčkách než při spalování benzínu. Také produkuje nízké emise škodlivých látek. Nevýhodou je jeho vyšší pořizovací cena a omezená možnost instalace.



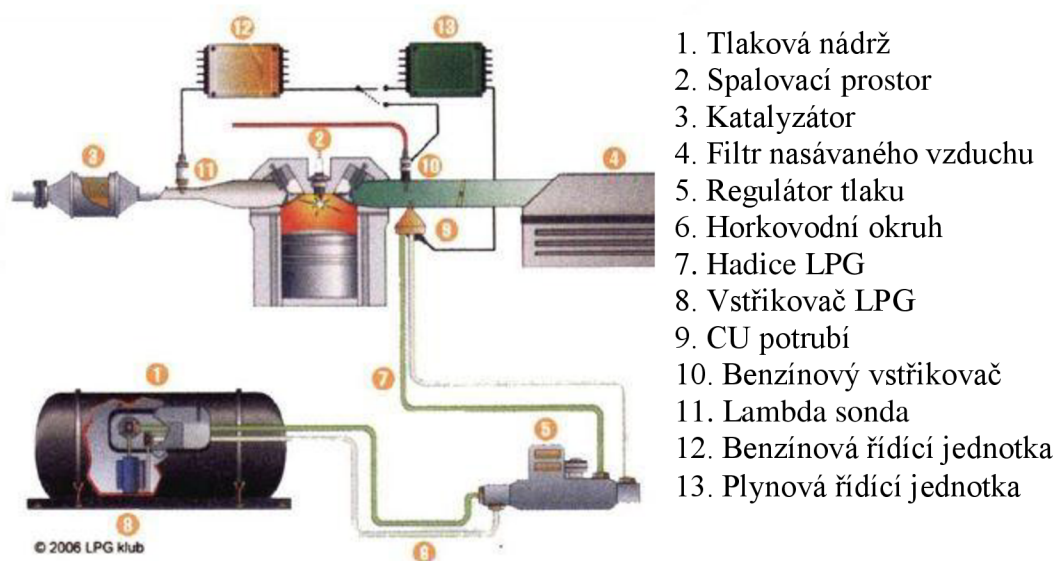
1. Tlaková nádrž
2. Příruba LDI
3. Benzínová příruba
4. FSU
5. Vysokotlakové čerpadlo
6. Teplotní čidlo
7. Řídicí jednotka LPG
8. Řídicí jednotka benzínu
9. Filtr LPG

Obr. 6 Schéma systému Direct Injection [63]

SYSTÉM VSTŘIKOVÁNÍ KAPALNÉHO LPG

Tento systém se využívá ve verzích Lpi, Lpfi a Lpsi. Systém dávkuje kapalný plyn pod vysokým tlakem pro každý válec zvlášť. Vlivem odpařování dochází k ochlazení proudícího vzduchu. Trysky, které vstříkují palivo, musejí být vyhřívány, aby nedocházelo k jejich zamrznutí. Ve vozidle musí být umístěno vysokotlaké čerpadlo, které udržuje konstantní tlak LPG v nádrži. V České republice jsou schváleny systémy Vialle, Prins [27].

Výhodou systému je srovnatelná spotřeba s provozem na benzín, vyšší nebo stejný výkon a splnění emisní normy EURO V. Tento systém je také vhodný pro velmi intenzivní provoz. Nevýhodou je jeho vysoká pořizovací cena.



Obr. 7 Schéma systému vstříkování kapalného LPG [22]

1.3.2 KOMPONENTY SYSTÉMU NA LPG



1. Plnicí hrdlo
2. Tlaková nádrž
3. Multiventil
4. LPG potrubí
5. Přepínač
6. Odpařovač
7. Elektrické vedení
8. Vstříkovač
9. Vstříkovač benzínu
10. LPG řídicí jednotka
11. Benzinová řídicí jednotka

Obr. 8 Schéma základních komponentů v automobilu Dacia Sandero [64]

TLAKOVÁ NÁDRŽ

Tlaková nádrž bývá nejčastěji válcového nebo toroidního tvaru, který má buď interní, nebo externí výstup. Na výstupu je umístěn multiventil. Objem válcové nádrže se pohybuje mezi 45 až 80 litry a toroidní nádrže od 30 do 59 litrů [28]. Nádrže se nejčastěji vyrábí z oceli nebo kompozitu. Nádrže z kompozitu mají menší hmotnost, ale jsou dražší. Toroidní nádrž se montuje místo zadního kola a válcová nádrž za zadní sedačky vozidla. Tlakové nádrže se plní jen na 80 % procent svého objemu, protože může dojít k prudkému vzrůstu tlaku při zvýšení teploty. Aby nedošlo k roztržení nádrže, využíváme omezovač plnění v multiventilu. V případě nárazu vozidla dojde pouze k deformaci nádrže, nikoli k výbuchu [32]. Životnost tlakových nádrží u LPG stanovuje vyhláška č. 341 Ministerstva dopravy České republiky na 10 let od data výroby nádrže [28].



Obr. 9 Tlaková nádrž [32]

MULTIVENTIL

Jedná se o víceúčelový ventil, který je pevně spojený s nádrží, která je jím utěsněna. Zajišťuje provozní a bezpečnostní funkce. Provozní funkce jsou uzavírání nádrže při vypnutém

zapalování, odebírání pohonných hmot z nádrže a ukazování stavu paliva v nádrži. Bezpečnostní funkce jsou uzavírání nádrže při vypnutém zapalování, zastavení plnění nádrže při 80 % objemu, zastavení toku paliva při úniku nad 6 litrů za minutu (porucha potrubí), vypouštění plynu při přetlaku nad 2,7 MPa, ruční uzavření přívodu plynu do nádrže a odpuštění plynu z nádrže v případě požáru [32].

PLNÍCÍ KONCOVKA

Plnicí koncovka umožňuje tankování LPG pomocí pistole. Její součástí je kuličkový tlakový ventil, který zabraňuje zpětnému unikání LPG z plnicího potrubí. V České republice se nejčastěji setkáváme s italskou koncovkou s kleštinou. V západní Evropě se také používá holandská koncovka s bajonetovým závitem [32]. U starých vozidel se plnicí koncovka nacházela ve vyvrtném otvoru ve spodní části blatníku vozidla. Moderní automobily mají nejčastěji plnicí koncovku vedle plnicího hrdla benzinové nádrže.

ŘÍDÍCÍ JEDNOTKA

Řídicí jednotka monitoruje všechny signály ze snímačů a na základě těchto údajů řídí provoz motoru na LPG a nastavuje optimální palivovou směs. Přesnější řídicí jednotky nám zaručují nižší spotřebu a komfortnější provoz a také mohou ovládat jiné součástky, jako jsou například vstřikovače [29].

PŘEPÍNAČ

Přepínač slouží k přepínání mezi pohonem na LPG a benzínem. U starých systémů byly přepínače manuální a umístěny v zorném poli řidiče, často v sobě měly ukazatel množství LPG v nádrži. Manuální přepínače měly tři polohy (jízda pouze na plyn, pouze benzín a střední poloha sloužící k využití zbytku benzínu v karburátoru). Elektronické přepínače se řídí pomocí otáček motoru. Benzín se používá pro studené starty a při nízkých otáčkách, po dosažení provozní teploty nebo určitých otáček dojde k přepnutí na LPG.

REDUKTOR

Reduktor redukuje tlak LPG z nádrže na tlak okolo 1 bar a mění LPG z kapalného stavu na plynný stav [32]. Plyn je poté přiváděn ke směšovači, kde dojde k míšení se vzduchem. Tato směs je přiváděna sacím potrubím do prostoru motoru. Reduktor musí být ohříván chladicí kapalinou z primárního okruhu chlazení motoru, protože by mohlo dojít k jeho zamrznutí díky nízké teplotě plynného LPG [31].

SMĚŠOVAČ

Směšovač je nejčastěji hliníkový díl, který byl montovaný pod karburátor nebo na škrťací klapku motoru. Dochází v něm k vytváření směsi propanu, butanu a vzduchu [32]. Tato součást byla osazována pouze do systému s centrálním směšovačem.

MAP SENZOR

MAP senzor (The **M**anifol **A**bsolute **P**ressure sensor) snímá tlak v sacím potrubí. Poskytuje okamžité informace o plnicím tlaku v řídicí jednotce. Díky získaným informacím lze zjistit hmotnostní tok paliva a dávkování paliva pro optimální spalování [30].

VSTŘIKOVAČE

Elektronické vstřikovače jsou řízeny řídicí jednotkou. Využívají se samostatné vstřikovače, které rozdělují samostatně plyn do každého válce zvlášť. Tato součástka využívá k řízení signály motoru a MAP senzor [32].

1.4 MOTOROVÁ VOZIDLA POHÁNĚNÁ LPG

Vozidla, které jsou poháněná LPG, lze zakoupit bez problému. Mezi značky, které produkují vozidla s pohonem LPG, patří: Fiat, Mitsubishi, Opel [33]. V provozu najdeme velké množství starších vozidel, která jsou přestavěná na spalování LPG. Všechna vozidla poháněná LPG musí jednou ročně podstoupit revizi systému LPG [35].

1.5 HODNOCENÍ LPG

Jedná se o nejdéle prováděnou a cenově velmi příznivou přestavbu vozidla. Specifikace přestavby jsou uvedeny u jednotlivých systémů LPG. Nejpoužívanější jsou systémy vstřikování kapalného LPG a systémy LPG direct injection. Upravené motory mají stejný nebo vyšší výkon než s benzínovým palivem. V České republice je zakázáno parkování v podzemních garážích, výjimku tvoří garáže s alespoň dvěma větracími otvory a garáže, které mají bezpečnostní hlásiče s výkonnou ventilací [34].

1.5.1 VÝHODY

- ✓ Levnější provoz vozidla
- ✓ Možnost přestavby staršího vozidla
- ✓ Rozsáhlá infrastruktura čerpacích stanice (1 337 čerpacích stanice v České republice)
- ✓ Propracovaná technologie systému na LPG
- ✓ Srovnatelná výhřevnost LPG s benzínem nebo naftou
- ✓ LPG je homogenní směs
- ✓ Jednoduché stlačení LPG
- ✓ Možnost zmenšit objem plynu až 250 krát
- ✓ V případě nárazu nedojde k explozi nádrže
- ✓ Srovnatelný dojezd vozidla s pohonem na benzín nebo naftu

1.5.2 NEVÝHODY

- × Závislost na ropě
- × Ztráty LPG kvůli regulaci tlaku v nádrži
- × Roční prohlídky systému LPG
- × Nutnost výměny nádrže po 10 letech
- × Nutnost přidávání aditivního maziva kvůli opotřebení sedel ventilů
- × Omezené možnosti parkování
- × Zmenšení zavazadlového prostoru kvůli instalaci nádrže

2 VODÍK

Vodík (Hydrogen) tvoří 75 % vesmíru. Je to nejrozšířenější plyn ve vesmíru. V plynné fázi se vodík vyskytuje pouze v horních vrstvách atmosféry. Jinak je obsažen ve všech organických sloučeninách [42]. Vodík jako palivo lze využít dvěma způsoby. Prvním způsobem je spalování vodíku v motoru vozidla. Druhým způsobem je využití vodíku v palivových článcích, které vyrábějí elektrickou energii. Tato energie je dodávána elektromotoru, který pohání vozidlo [43].

V České republice se nachází jediná stanice čerpající vodík. Nachází se v Neratovicích, byla vybudována v roce 2009 a slouží pro tankování autobusu městské hromadné dopravy. V nejbližších letech má v plánu společnost Benzina postavit další tři čerpací stanice na vodík. Tyto stanice by se měli nacházet v Praze, Litvínově a Brně [44]. V celé Evropě je postaveno 177 čerpacích stanic na vodík. Největší zastoupení mají v Německu.

2.1 VLASTNOSTI VODÍKU

Jedná se o nejjednodušší prvek, který má atomové číslo 1. V normálních podmínkách je vodík hořlavý plyn, bez barvy, chuti a zápachu. Je mnohonásobně lehčí než vzduch. Ve směsi se vzduchem je vodík silně výbušný. Mez výbušnosti se pohybuje mezi 19 – 59 % [45]. Vodík má nejvyšší poměr energie, která je vztažena k hmotnosti.

Kapalný vodík má bod varu $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, je to bezbarvá, lehká kapalina, která zaujímá o 80 % menší objem, než stlačený plynný vodík [67].

Tab. 3 Vlastnosti vodíku [42]

Vlastnost	Vodík	Jednotka
Struktura	šesterečná	[-]
Teplota tání	-259,125	[$^{\circ}\text{C}$]
Teplota varu	-252,882	[$^{\circ}\text{C}$]
Hustota plynného stavu	0,09	[kg/m^3]
Hustota kapalného stavu	0,07	[kg/m^3]
Tlak nasycené páry při $-250,15^{\circ}\text{C}$	209	[Pa]
Měrná tepelná kapacita	14 304	[$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]
Spalné teplo	72	[kJ/mol]
Objemová výhřevnost	10,8	[MJ/m^3]
Hmotnostní výhřevnost	119,55	[MJ/kg]

Vodík je velmi reaktivní prvek, vytváří sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky, jedinou výjimku tvoří vzácné plyny. Má tři izotopy – protium (^1H), deuterium, (^2H) a tritium (^3H) [46].

2.2 PLNÍCÍ STANICE

V České republice se nachází jediná čerpací stanice na vodík v Neratovicích. Vodík je skladován v zásobníku, který má objem 50 m³. Plnění vodíkem se provádí při tlaku 350 barů [47]. Společnost Benzina v České republice plánuje vybudovat další tři plnicí stanice. V roce 2019 na světě existovalo 432 plnicích stanic na vodík, z toho 177 v Evropě. V Německu je vystavěno 87 stanic, ve Francii 26. V nejbližších letech se očekává nárůst počtu plnicích stanic na vodík. Francie má v plánu vybudovat dalších 34 stanic, Nizozemsko 21 [48].



Obr. 10 Mapa vodíkových čerpacích stanic v Evropě [55]

2.3 VÝROBA VODÍKU

Vodík lze vyrábět různými způsoby. Nejvyužívanější je výroba z fosilních paliv (parní reformování). Dále můžeme vodík vyrábět pomocí obnovitelných zdrojů např. z biomasy, elektrolyzou vody, parní elektrolyzou. Vodík také lze získat jako vedlejší produkt v chemických závodech [49].

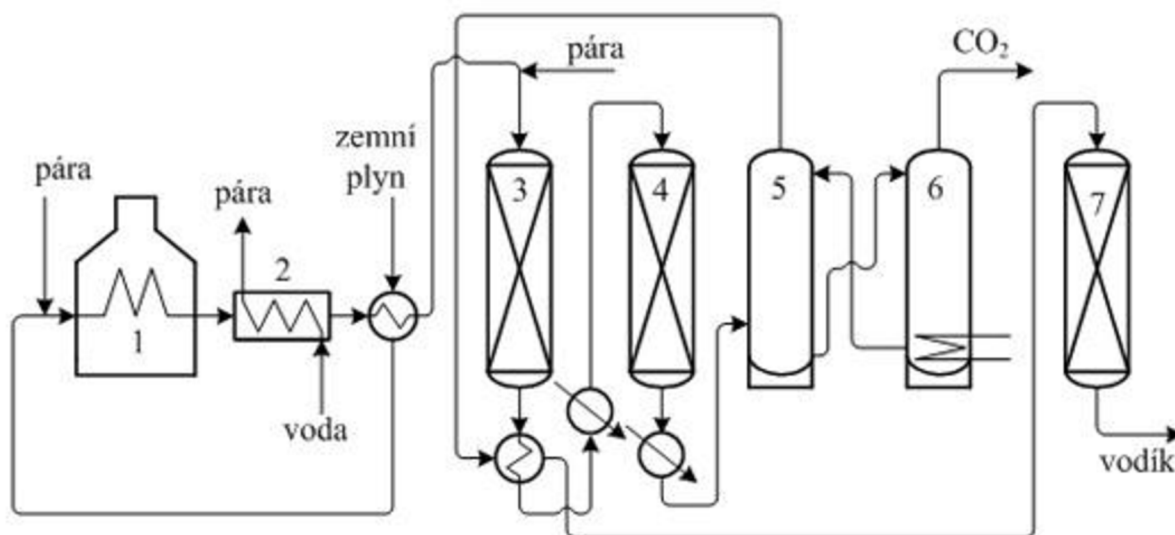
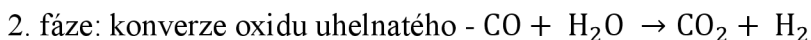
2.3.1 PARNÍ REFORMOVÁNÍ

Jedná se o nejlevnější a nejrozšířenější (96 % světové produkce vodíku) technologii výroby vodíku. Účinnost této technologie se pohybuje okolo 80 % a závisí na poměru páry a uhlíku ve směsi [49]. Nejčastěji se využívá zemní plyn jako surovina pro výrobu vodíku, ale lze využívat i etan nebo propan.

Proces je rozdělen do dvou fází. Je prováděn v pecích při teplotě 750 až 800 °C a tlaku 3-5 MPa. Potrubí je naplněno katalyzátorem na bázi oxidu nikelnatého (NiO). V první fázi dochází k přivedu metanu (CH₄) do vodní páry. Reformování se provádí za přebytku vodní páry, protože by mohlo docházet k usazování uhlíku na katalyzátoru. Směs reaguje za vzniku vodíku, oxidu uhelnatého (CO) a oxidu uhličitého (CO₂). V druhé fázi dochází k reakci oxidu uhelnatého a vodní páry. V této konverzi vzniká vodík a oxid uhličitý (CO₂). Oxid uhličitý

získaný parním reformováním je vypouštěn do atmosféry nebo je zkapalněn a dále využíván jako chladivo [50].

Chemické reakce:



Obr. 11 Schéma parního reformování [50]

(1 – pec, 2 – kotel na výrobu páry, 3 – vysokoteplotní konvertor CO, 4 – nízkoteplotní konvertor CO, 5 – absorbér, 6 – desobér, 7 - metanizér)

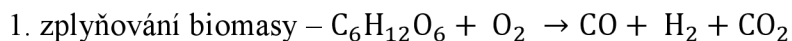
Nevýhodou tohoto způsobu výroby je využití fosilních paliv a vznik velkého množství oxidu uhličitého (CO_2).

2.3.2 ZPLYŇOVÁNÍ BIOMASY

Pro zplynění se v současné době využívá několik technologií. Základní metoda je zplyňování v generátorech s pevným ložem. Tato technologie není finančně náročná, ale lze ji použít pouze pro malé tepelné výkony. Ke zplyňování dochází ve vrstvě biomasy při teplotách okolo $500\text{ }^\circ\text{C}$ a atmosférickém tlaku [51].

Další metoda je zplyňování ve fluidních generátorech. Proces probíhá při teplotách 850 až $950\text{ }^\circ\text{C}$ a atmosférickém tlaku. V tlakových generátorech proces probíhá za stejných teplot, ale tlak se pohybuje mezi $1,5$ až $2,5\text{ MPa}$. Zplyňování je doplněno o konverzi oxidu uhelnatého (CO) [51].

Chemické reakce:



2. konverze oxidu uhelnatého – $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$

V současné době je dáována přednost systémům, které mají atmosférické zplyňování, protože zařízení s biomasou mají malé jednotkové výkony. Nevýhodou tohoto způsobu výroby je tvorba dehtových látek a fenolů [51].

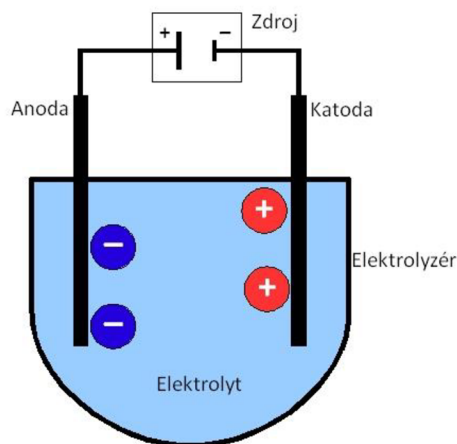
2.3.3 ELEKTROLÝZA

„Elektrolýza je proces, při kterém stejnosměrný proud při průchodu vodným roztokem štěpí chemickou vazbu mezi vodíkem a kyslíkem.“ [52]

Vodíkový kation H^+ reaguje na katodě za vzniku plynu, který je jímán a následně uskladněn. Elektrolýza probíhá za pokojových teplot a pro její chod je potřeba pouze dodávat elektrickou energii. Touto technologií se vyrábí asi 4 % světové produkce vodíku. Účinnost procesu dosahuje až 92 %. Výstupem elektrolýzy je čistý vodíkový plyn, který není potřeba dočišťovat, a kyslík [52].

Chemické reakce:

1. elektrolýza vody – $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$



Obr. 12 Schéma elektrolýzy [56]

Konvekční elektrolýza je velmi výhodná, pokud máme k dispozici levnou elektřinu a dostatek vody. Účinnost elektrolýzy lze zvýšit přidáním elektrolytu (soli), který zvýší vodivost vody. Celková účinnost je ovlivněna účinností výroby elektrické energie a pohybuje se v rozmezí 25 až 35 %. Jedná se o drahou technologii [52].

2.3.4 VYSOKOTEPLTNÍ ELEKTROLÝZA

Další označení pro tuto technologii je parní elektrolýza. Pro tento způsob výroby vodíku je charakteristické dodávání elektrické energie a tepla. Elektrolýza probíhá ve vysokoteplotním elektrolyzátoru. Do elektrolyzátoru vstupuje vodík a pára, z něho vystupuje obohacená směs,

kteřá obsahuje 75 % hm. vodíku a 25 % hm. páry. Na anodě se odděluje iont kyslíku, který prochází skrz membránu. Vodík je v kondenzační jednotce oddělen od páry [52].

Účinnost parní elektrolýzy ovlivňuje spotřeba elektrické energie a ohřev páry. Menší spotřeba elektrické energie účinnost zvyšuje, ale nutný ohřev páry ji naopak snižuje. Celková účinnost parní elektrolýzy dosahuje až 45 % [52].

Výhodou parní elektrolýzy je v cirkulaci samotných H_2O , H_2 a O_2 bez jiných chemických látek, díky kterým dochází o odstranění koroze [52].

2.3.5 PYROLÝZA

Jedná se o fyzikálně-chemický děj, při kterém dochází k rozkladu organických materiálů bez přístupu kyslíku. Podstatou této technologie je ohřev materiálu nad mez termické stability přítomných organických sloučenin. Tento ohřev zapříčiní jejich štěpení na stále nízkomolekulární produkty a tuhý zbytek. Pyrolýzní procesy lze rozdělit dle dosahované teploty [51].

Pyrolýza zahrnuje tři teplotní oblasti. V oblasti do 200 °C dochází k sušení a tvorbě vodní páry. V rozmezí teplot 200 až 500 °C probíhá karbonizace. Dochází k odštěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních látek a k přeměně makromolekulárních struktur na plynné a kapalné organické produkty a pevný zbytek. V oblasti teplot 500 až 1200 °C dochází k tvorbě stabilních plynů. Primární produkty, které vznikly karbonizací, jsou dále štěpeny a transformovány [51].

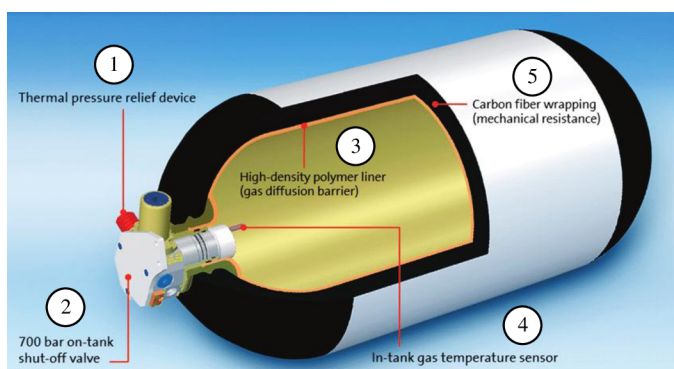
2.3.6 DALŠÍ ZPŮSOBY VÝROBY

Mezi další způsoby výroby vodíku patří – zplyňování uhlí, termochemické cykly štěpení vody, redukce zinku, fotoelektrochemické metody a biologické způsoby výroby [51].

2.4 SKLADOVÁNÍ VODÍKU

2.4.1 SKLADOVÁNÍ PLYNNÉHO VODÍKU

Pro skladování plynného vodíku se nejčastěji využívají bezešvé láhve z nízkouhlíkaté nebo legované oceli. Pro běžné aplikace se objem láhví pohybuje od 0,8 l až do 140 l. Kompozitní tlakové nádoby se používají v mobilních aplikacích. Provozní tlak je 35 MPa, v novějších aplikacích může tlak dosahovat až 100 MPa. Úniku plynu z láhve přes strukturu kompozitu zabraňuje tenká vrstva kovu nebo speciálního polymeru. Vodík je před skladováním v nádržích stlačit na požadovaný tlak. Ke stlačení se využívají pístové kompresory [54].



Obr. 13 Láhev pro skladování plynného vodíku [65]

(1 – Regulační mechanismus, 2 - Ventil, 3 – Polymerová vložka,
4 - Teplotní senzor, 5 - Hliníkový obal)

2.4.2 SKLADOVÁNÍ KAPALNÉHO VODÍKU

Vodík je skladován při teplotě -252 °C . Takto nízká teplota vytváří vysoké energetické nároky na zkapalnění a vysoké nároky na materiály, ze kterých jsou vyrobeny nádrže. Nádrže jsou vícevrstvé a mají dobré izolační vlastnosti, mají přetlak 0,5 MPa. Nádrže musí být vybavené přetlakovým mechanismem, který reguluje maximální přípustný tlak. Vlivem okolního tepla dochází k postupnému odpařování vodíku a zvyšování tlaku v nádrži. Tlak je regulován odpouštěním vodíku. Denní ztráty mohou dosahovat až 3 % obsahu vodíku v nádrži. Unikající vodík je možné jímát a stlačovat do přidavných tlakových láhví [54].



Obr. 14 Průřez nádrže na kapalný vodík [54]

2.4.3 DALŠÍ ZPŮSOBY SKLADOVÁNÍ

Vodík lze skladovat dalšími způsoby. Může být skladován v hydridech kovů, v borohydridech, v uhlíkových strukturách, v uhlíkových trubicích a v skleněných mikrokuličkách. Skladování ve formě hydridů je finančně náročné. Další způsoby skladování jsou ve fázi výzkumu [54].

2.5 MOTOROVÁ VOZIDLA POHÁNĚNÁ VODÍKEM

Protože spalování vodíku není efektivní, automobilky se zaměřily na využití vodíku v palivových článcích. Technologii palivových článků využívají nejvíce asijské automobilky – Toyota, Hyundai, Nissan, ale i ostatní automobilky – Opel, Mercedes-Benz. V roce 2014 vznikla první generace vozidla Toyota Mirai. Jedná se o nejrozšířenější automobil, který využívá k pohonu vodíkové palivové články [60]. Toyota Mirai využívá technologii TFCS (Toyota Fuel Cell System). Tato technologie kombinuje palivové články s hybridním pohonem [61].



Obr. 15 Toyota Mirai [62]

2.6 HODNOCENÍ VODÍKU

Malá účinnost motoru při spalování vodíku je velká nevýhoda. Při spalování vodíku dochází k využití malého množství jeho energie. K dalším ztrátám energie dochází při stlačování, zkapalnění a skladování vodíku. Cena vodíku v České republice se na podzim roku 2020 pohybovala kolem 250 korun za jeden kilogram. Při průměrné spotřebě jeden kilogram vodíku na 100 kilometrů vychází jeden kilometr na 2,50 Kč. Cena provozu na vodík je v porovnání s provozem na benzín nebo elektřinu vysoká. Do budoucna se předpokládá snížení ceny vodíku [58]. Při spalování vodíku také dochází k tvorbě oxidů dusíku (NO_x), které jsou škodlivé. Vodík jako palivo pro spalovací motory není příliš výhodný, ale naopak jeho využití v palivových článcích a jako příměs k jiným palivům se jeví jako výhodné. Palivové články v automobilu se využívají k pohonu elektromotoru. Vodík jako příměs lze přidat k metanu, benzínu, naftě a LPG. Směs se zemním plynem se jmenuje HCNG nebo Hythane [59].

2.6.1 VÝHODY

- ✓ Využití vodíku pro palivové články
- ✓ Vodík lze vyrábět z biopaliv
- ✓ Nulové emise pohonu na vodík (kromě oxidů dusíku)
- ✓ Vodík lze využít jako příměs k dalším palivům
- ✓ Vysoká výhřevnost vodíku
- ✓ Vysoká rychlost hoření vodíku
- ✓ Velký potenciál využití vodíku

2.6.2 NEVÝHODY

- × Nízká účinnost paliva
- × Vysoká cena
- × Tvorba oxidů dusíku
- × Malá infrastruktura a nákladný provoz čerpacích stanic
- × Nízká objemová výhřevnost
- × Při vytvoření směsi se vzduchem nebezpečí výbuchu
- × Velké ztráty energie při výrobě a skladování
- × Ztráty vodíku při regulaci tlaku v nádržích
- × Vysoká náročnost zkapalnění vodíku
- × Výroba vodíku pomocí fosilních paliv

3 CNG, LNG

Zemní plyn se pro pohon motorových vozidel používá ve dvou skupenských stavech. Používá se buď jako stlačený zemní plyn (**C**ompressed **N**atural **G**as) nebo jako kapalný zemní plyn (**L**iquefied **N**atural **G**as). Zemní plyn obsahuje zejména metan (CH_4), je to jeho hlavní složka. Mezi doprovodné hořlavé složky zemního plynu patří: ethan (C_2H_6), propan (C_3H_8), butan (C_4H_{10}) a mezi nehořlavé doprovodné složky patří: oxid uhličitý (CO_2), sulfan (H_2S), kyslík (O_2), dusík (N_2). Nehořlavé složky snižují kvalitu zemního plynu [1].

V České republice je ke konci roku 2020 postaveno 219 CNG plnicích stanic a 2 LNG plnicí stanice. V České republice se nachází dle Českého plynárenského svazu 27 748 vozidel, z nichž 2091 jsou nákladní vozidla nebo autobusy [2].

3.1 VLASTNOSTI CNG A LNG

Zemní plyn je bezbarvý plyn, bez zápachu a bez chuti. Jedná se o nejedovatý, hořlavý, výbušný plyn. Je lehčí než vzduch [3]. Ve výfukových plynech snižuje obsah škodlivin. V porovnání s LPG má velký zástavbový objem a hmotnost palivových zásobníků je vysoká. Nejčastěji zemní plyn používáme stlačený v tlakových lahvích s plnicím tlakem 20 MPa, protože při tomto tlaku je objem zemního plynu 200krát menší. Oktanové číslo zemního plynu, které se mění podle jeho složení, je 100 až 130 [1].

Zkapalněný zemní plyn je namodralá, netoxická, nekorozivní, průzračná kapalina, která má minimální viskozitu [6]. Pokud zemní plyn ochladíme na teplotu -162°C dojde k jeho zkapalnění. Po zkapalnění lze zemní plyn uchovávat v kryogenních nádržích při přetlaku 0,15 MPa. Při tomto způsobu skladování se objem plynu zmenší přibližně 600krát [1]. Vytěžený zemní plyn dělíme do čtyř základních skupin podle složení [3] – citace:

1. zemní plyn suchý (chudý) – vysoký obsah metanu (95 – 98 %) a nepatrné množství vyšších uhlovodíků.
2. zemní plyn vlhký (bohatý) – obsahuje vyšší podíl vyšších uhlovodíků na rozdíl od suchého zemního plynu
3. zemní plyn kyselý – plyn s vysokým obsahem sulfanu (H_2S), který je nutný odstranit před dodávkou do distribučního systému
4. zemní plyn s vyšším obsahem inertních plynů – obsahuje vyšší množství oxidu uhličitého (CO_2) a dusíku (N_2)

Zemní plyn se podle způsobu těžby dělí na naftový a karbonský. Naftový zemní plyn se vyskytuje ve společném ložisku s ropou nebo s vodou. Karbonský zemní plyn lze získat při těžbě černého uhlí, ovšem z bezpečnostního hlediska je nutné ho z dolů odčerpávat [5].

Tab. 4 Vlastnosti CNG v porovnání s benzínem a motorovou naftou [4]

Vlastnost	Benzín	CNG	Nafta	Jednotka
Převažující uhlovodíky	C ₄ až C ₁₀	CH ₄	C ₁₀ až C ₂₂	[-]
Hustota při 15°C (pro CNG při 20°C)	720 – 775	0,693	800 – 845	[kg/m ³]
Objemová výhřevnost při 25°C	31 – 33	34,2	35,6	[MJ/dm ³]
Hmotnostní výhřevnost	42 – 44	50	42,5	[MJ/kg]
Teplota vznícení	450	650	250	[°C]
Bod/rozmezí varu	30 – 210	-162	160 – 360	[°C]
Bod tuhnutí	pod -45	-183	0 až -32	[°C]
Oktanové číslo	91 – 100	130	-	[-]

3.2 PLNÍČÍ STANICE V ČESKÉ REPUBLICĚ



Obr. 16 Mapa CNG stanic v České republice [57]

V České republice se nachází 219 plnicích stanic na stlačený zemní plyn. Národní akční plán čisté mobility předpokládá, že do roku 2030 se počet veřejných plnicích stanic zvětší na 350 až 400 [7]. Tankování CNG do vozidel můžeme provádět dvěma způsoby.

V plnicích stanicích s rychlým plněním dochází k odebírání zemního plynu z plynovodní sítě, vysušení v sušičkách a k následnému stlačení na tlak 20 – 30 MPa. Takto stlačený zemní plyn je skladován v tlakových zásobnících. Do vozidel se stlačený zemní plyn přepouští prostřednictvím výdejního stojanu. Doba plnění CNG vozidla se pohybuje mezi 3 až 5 minutami, jedná se o dobu srovnatelnou s čerpáním kapalných pohonných hmot. U stanic s pomalým plněním je zemní plyn přímo tankován kompresorem do vozidla. Plnění tímto způsobem trvá zpravidla několik hodin, a proto je vhodný k tankování v nočních hodinách nebo přestávkách v jízdě [7].

Plnicí stanice LNG se skládají z několika kryogenních nádrží, kde je zemní plyn uchováván. Doba plnění je srovnatelná s čerpáním kapalných paliv. V Evropě lze LNG tankovat u více než 280 stanic [10]. Největší zastoupení mají tyto stanice v Itálii, Španělsku, Německu a Francii [8]. Poslední způsobem skladování jsou LCNG (**L**iquid to **C**ompressed **N**atural **G**as) plnicí stanice. Tyto stanice mají kryogenní nádrž, ve které je uchováváno LNG. Zkapalněný zemní plyn je dopraven pod vysokým tlakem do výparníku, kde dochází k přeměně na CNG a to je skladováno v tlakových nádobách [9].

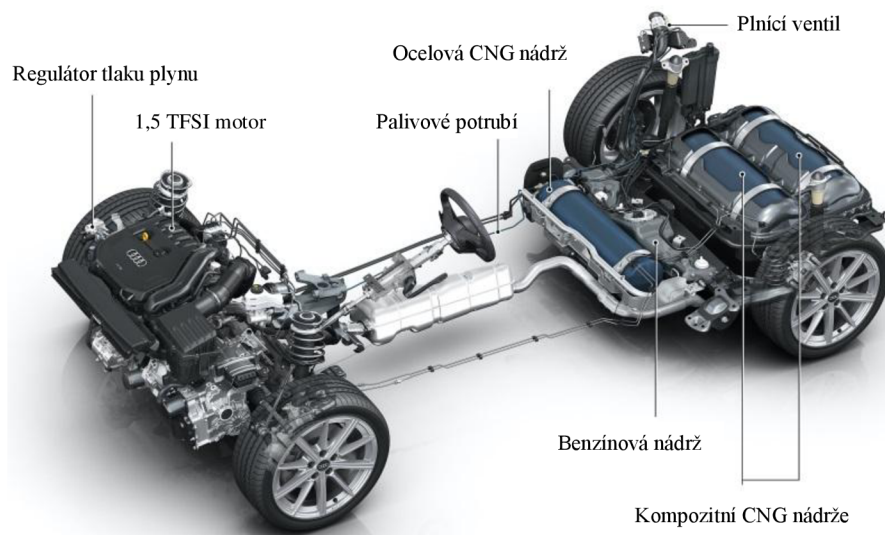
V nádržích, které obsahují CNG, dochází k Joule-Thompsonovu efektu [11]. Tento efekt je definován jako změna teploty plynu, která je vyvolaná změnou jeho tlaku. Přidáním vodíku nebo hélia dojde k potlačení tohoto efektu [12].

3.3 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ VOZIDEL NA CNG

3.3.1 PŘESTAVBA NA CNG SYSTÉMY

CNG systémy jsou podobné jako systémy LPG. Cena přestavby je dražší než u LPG, z tohoto důvodu nedochází k přestavbě starších vozidel. Přestavují se vozidla disponující systémem palubní diagnostiky EOBD. Nejčastějším systémem je systém sekvenčního vstřikování. Pokud dojde k přestavbě vozidla se zážehovým motorem, lze nadále využívat i benzin. Získáme dvoupalivové vozidlo (bifuel vehicle). Vznětové motory (nákladní vozidla a autobusy) tuto výhodu postrádají, jde o jednopalivové vozidlo (monofuel vehicle). Ve velké míře dochází k přestavbám autobusů v městském provozu.

3.3.2 KOMPONENTY SYSTÉMU CNG



Obr. 17 Schéma komponentů v automobilu Audi A3 [66]

Řídící jednotka, přepínač CNG/benzín, MAP senzor, vstřikovač mají shodné funkce jako komponenty uvedené v kapitole LPG. Změny jsou u komponentů: plnicí ventil, regulátor tlaku, závěrný ventil nádrže a palivová nádrž.

PLNÍCÍ VENTIL

Využívají se dva typy plnicích ventilů – NGV1 (Natural Gas Vehicle) a NGV2. Plnicí ventil NGV1 využívají osobní a dodávková vozidla. Doba plnění se pohybuje v řádu minut. NGV2 využívají nákladní vozidla a autobusy. Doba plnění se pohybuje v řádu hodin [36]. Plnicí hrdlo CNG se nachází nejčastěji vedle plnicího hrdla palivové nádrže.

REGULÁTOR TLAKU

Regulátor tlaku redukuje vysoký tlak z tlakové nádrže do vstřikovacího zařízení. Regulátor se nachází v motorovém prostoru a je napojen na chladič systém, protože je potřeba ho zahřívát [67]. Snižování tlaku probíhá ve dvou fázích. Nejprve dojde k mechanickému snížení na 20 barů, poté dochází k elektronické regulaci, kde dojde úpravě tlaku podle potřeby na 5-9 barů [37].

ZÁVĚRNÝ VENTIL

Závěrný ventil slouží k uzavření tlakové nádrže. Využívá se při pracích na nádrži. Pokud dojde ke zvýšení tlaku i při uzavřeném ventilu, dojde k otevření bezpečnostního ventilu.

TLAKOVÁ NÁDRŽ

CNG nádrže jsou vyráběny pouze jako válcové. Objem nádrže se nejčastěji pohybuje v rozmezí 70 až 100 litrů [67]. Vyrábějí se z oceli, hliníkových slitin nebo kompozitních materiálů, které jsou stejně pevné jako ocel, ale váží mnohem méně [38]. CNG nádrže jsou nainstalovány v zavazadlovém prostoru nebo pod ním. LNG nádrže jsou menší než nádrže na CNG. Zkapalněný plyn se uchovává o teplotě -162 °C a přetlaku 0,15 MPa [1]. Technologie LNG nádrží je složitější a nákladnější než u CNG nádrží.

3.4 MOTOROVÁ VOZIDLA POHÁNĚNÁ CNG

Vozidla s pohonem na CNG produkuje velký počet automobilek. Lze zakoupit osobní i dodávková vozidla. Automobilky, které sériově vyrábí CNG vozidla, jsou: Škoda, Volkswagen, Audi, Seat, Opel, Fiat, Mercedes-Benz, Volvo [39]. U starších vozidel nedochází tak často k přestavbám na CNG, jako v případě LPG, protože se jedná o složitější a finančně náročnější přestavbu. Stejně jako vozidla na LPG i vozidla s pohonem na CNG musí každý rok podstoupit revizi plynového systému [35].

Pohon na CNG také využívají nákladní vozidla a autobusy. Automobilky produkující nákladní vozidla na CNG jsou: Iveco, Mercedes-Benz, Renault, Scania a Volvo [41]. Autobusy vyrábí automobilky: Neoplan, Irisbus, Evobus, SOR [41]. CNG autobusy jsou nečastěji využívány v městské hromadné dopravě. V případě nákladních vozidel je jejich použití všestranné.

3.5 HODNOCENÍ CNG

Plynná paliva mají výhodu, protože vytváří homogenní směsi. Při spalování chudé směsi klesá spotřeba, výkon lze zvýšit zvýšením kompresního poměru. Technologie skladování a pohonu CNG je bezpečná, ekologická a propracovaná. Vozidla na CNG lze parkovat v podzemních garážích, pokud splňují dané technické podmínky (zajištěné odvětrávání). V České republice tyto podmínky splňují všechny nové podzemní garáže [40]. Počet vozidel s pohonem na CNG by v nejbližších letech měl převýšit počet vozidel s pohonem na LPG.

3.5.1 VÝHODY

- ✓ Levný provoz vozidla
- ✓ Široké využití (osobní automobily, dodávky, nákladní automobily, autobusy)
- ✓ Vysoké oktanové číslo
- ✓ Možnost zmenšit objem plynu – v případě CNG 200krát, v případě LNG 600krát
- ✓ Srovnatelná výhřevnost CNG s benzínem a naftou
- ✓ Velmi nízké hodnoty emisí
- ✓ Rozrůstající se infrastruktura čerpacích stanic (219 stanic CNG a 2 LNG stanice)
- ✓ Jednoduchá distribuce plynu pomocí plynovodů
- ✓ Propracovanost systému CNG
- ✓ Nízká hmotnost kryogenních a kompozitních nádrží
- ✓ Dojezd vozidla při kombinaci pohonu na obě paliva

3.5.2 NEVÝHODY

- × Nízký počet LNG stanic
- × Ztráty LNG kvůli regulaci tlaku v nádržích
- × Roční prohlídky systému CNG
- × Joule-Thompsonův efekt
- × Nutnost přidávání aditivního maziva kvůli opotřebení sedel ventilů
- × Energeticky náročná přeměna na LNG
- × Vyšší pořizovací cena nových vozidel

4 POROVNÁNÍ CNG A NAFTY

Využití CNG v hromadné dopravě je velmi výhodné. V České republice je v provozu více jak 1700 autobusů poháněných CNG [69]. Nejčastěji jsou využívány v městské hromadné dopravě, kvůli ekologickému a levnému provozu, protože CNG má dlouhodobě garantovanou nízkou spotřební daň.

Porovnáme použití CNG s motorovou naftou pro motor Iveco Cursor. Tento motor lze najít v autobusu Iveco Urbanway 18M, kde je poháněn CNG a v autobusu Irisbus Citelis 18M, kde je poháněn naftou. Oba dva autobusy jsou využívány Dopravním podnikem města Brna.

4.1 VOZIDLA

Autobusy Iveco Urbanway 18M a Irisbus Citelis 18M jsou největší autobusy, kterými brněnský dopravní podnik disponuje. Jedná se o kloubové autobusy. Dopravní podnik disponuje 44 autobusy Urbanway a 22 autobusy Citelis. Autobusy Urbanway jsou v provozu od roku 2017, autobusy Citelis od roku 2007 [70]. Rozměrově jsou si oba autobusy podobné, mají přibližně stejnou kapacitu, a proto porovnáme právě tato vozidla. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Technické parametry srovnávaných autobusů [71]

Vlastnost	Urbanway 18M	Citelis 18M	Jednotka
Délka	17 910	17 800	[mm]
Šířka	2 500	2 500	[mm]
Hmotnost	17 910	17 300	[kg]
Motor	Iveco Cursor 8 CNG	Iveco Cursor F2 B	[-]
Výkon	243	213	[kW]
Kapacita	111	157	[-]
Rychlost	80	80	[km/hod]

4.2 SROVNÁNÍ

Srovnávat výše uvedené motory budeme v programu MATLAB[®]. Skripty jsou využívány ve výuce předmětu Teorie spalovacích motorů.

Kompresní poměr v případě CNG je 12, v případě nafty 17. Výsledné hodnoty jsou počítány pro otáčky největšího momentu. V případě nafty došlo ke zjednodušení výpočtu. Reálný naftový motor je přeplňovaný, ale výpočet je proveden bez přeplňování. Budeme porovnávat střední indikovaný a efektivní tlak, indikovaný a efektivní výkon a točivý moment.

STŘEDNÍ INDIKOVANÝ TLAK

Jedná se o ukazatel kvality pracovního oběhu motoru. Nelze ho přímo změřit, je to fiktivní veličina. Pomocí této veličiny lze stanovit indikovaný výkon motoru [72].

Střední indikovaný tlak p_i [72]:

$$p_i = \frac{W_i}{V_z} \quad (1)$$

kde W_i je indikovaná práce oběhu a V_z je zdvihový objem.

STŘEDNÍ EFEKTIVNÍ TLAK

Umožňuje objektivní porovnávání motorů z hlediska energetického využití zdvihového objemu. Jedná se o fiktivní veličinu. Pomocí této veličiny lze stanovit efektivní výkon motoru [72].

Střední efektivní tlak p_e [72]:

$$p_e = p_i \cdot \eta_m \quad (2)$$

kde η_m je mechanická účinnost motoru.

INDIKOVANÝ VÝKON

Jedná se o výkon získaný prací oběhu spalovacího motoru bez uvažování ztrát [73].

Indikovaný výkon P_i [74]:

$$P_i = \frac{i}{600} \cdot p_i \cdot V_z \cdot n \cdot z \quad (3)$$

kde n jsou otáčky motoru, z je počet válců a i je taktnost motoru.

EFEKTIVNÍ VÝKON

Efektivní výkon je zjišťován na výstupním konci hlavního hřídele motoru. Jeho velikost je oproti indikovanému výkonu snížena o ztráty třením, pohonem pomocných zařízení motoru, hydraulické ztráty [73].

Efektivní výkon P_e [72]:

$$P_e = P_i \cdot \eta_m \quad (4)$$

4.3 ZHODNOCENÍ

Srovnáním zjišťujeme, že v případě pohonu na CNG dojde k 7% nárůstu srovnávaných hodnot. Zjednodušení výpočtu v případě pohonu na naftu toto navýšení příliš nezmění. Kdybychom nevyužili zjednodušení, tento rozdíl by byl menší, ale stále zaznamatelný. Motor Iveco Cruisor při pohonu na CNG efektivnější, produkuje méně škodlivých emisí a jeho provoz je cenově výhodnější. Srovnávané hodnoty jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 Srovnávané výkonové parametry motorů

Vlastnost	CNG	Nafta	Jednotka
Střední indikovaný tlak	1,916	1,790	[MPa]
Střední efektivní tlak	1,648	1,539	[MPa]
Indikovaný výkon při 1100 otáčkách	153	143	[kW]
Efektivní výkon při 1100 otáčkách	132	123	[kW]
Točivý moment	1 142	1 067	[Nm]

ZÁVĚR

Ve své bakalářské práci jsem se zaměřil na alternativní plynná paliva pro zážehové spalovací motory. Zhodnotil jsem jejich vlastnosti, popsal jejich využití a stanovil jejich výhody a nevýhody.

Plynná paliva mají mnoho výhod oproti kapalným palivům. Stejně skupenství umožňuje lepší mísení paliva se vzduchem a vytvoření správného směšovacího poměru. Díky dokonalému využití vzduchu u chudých směsí docílíme lepší čistoty paliva. Plynná paliva nesmývají mazací oleje v motorovém prostoru. Mají zpravidla větší oktanové číslo než benzín nebo nafta. LPG, CNG a LNG získáváme jako vedlejší produkt při těžbě ropy, proto je cenově výhodnější.

Z uvedených plyných paliv bych upřednostnil CNG, případně LNG. Tento typ paliva je ekonomicky velmi výhodný, protože je podporován Českou republikou jako jeden z hlavních alternativních zdrojů. Má velmi nízké emise škodlivých látek. Další výhodou je delší životnost zásob zemního plynu v porovnání se zásobami ropy a také rovnoměrné rozložení nalezišť po světě.

Počet plnicích CNG stanic v České republice je dostatečný a stále vzrůstá. Díky výše uvedeným výhodám toto palivo využívá stále větší počet osob.

Velký význam má plynofikace motorových vozidel zejména pro autobusovou a komunální dopravu ve velkých městech, kde dochází k nahrazování naftových autobusů autobusy plynovými. Přínos nasazení CNG autobusů v městské dopravě má pozitivní vliv na snižování lokálních emisí. Ve vozidlech není potřeba využívat drahé emisní systémy, jako jsou filtry pevných částic, SCR (Selective Catalytic Reduction) katalyzátory. Také není potřeba využívat AdBlue. Díky vyššímu obsahu vodíku má CNG dobrý vliv na snižování CO₂.

V provedeném srovnání zjišťujeme, že motory poháněné CNG jsou efektivnější, dosahují vyšších výkonů bez zásadních změn motoru. V našem případě došlo k zefektivnění o 7 %. Tento rozdíl není příliš velký, ale při každodenním ujetí 250 km může dosáhnout roční úspora 15 miliónů Kč [75].

Nevýhodou při pořizování vozidel poháněných CNG je jejich vyšší cena. V případě LNG dochází ke ztrátám v nádržích. Udržení nízké teploty kapalného zemního plynu je energeticky velmi náročné.

Spalování zkapalněného ropného plynu už není výhodnější než spalování benzínu nebo nafty v současných motorech. Systémy LPG jsou značně zastaralé a využívají se nejčastěji v přestavbách starších vozidel, tato přestavba je cenově nenáročná. Výhodou je rozsáhlá infrastruktura plnicích stanic.

Vodík jako palivo není efektivní. Spalování vodíku má velmi malou účinnost, také je potřeba dodávat energii při stlačování, zkapalňování a skladování vodíku. Díky těmto nedostatkům se vodík jako palivo téměř vůbec nepoužívá. Využívá se ale v palivových článcích, kde je velmi efektivní. Pohon pomocí vodíkových článků má nulové emise a je velmi efektivní. V roce 2021 ovšem existuje jen malé množství automobilek, které se vodíkovým článkům věnuje. V řádu několika let by se tato skutečnost mohla změnit, protože se jedná o alternativní palivo, které má velmi velký potenciál.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HROMÁDKO, Jan. Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [2] Statistiky. CNG4you [online]. Praha: Český plynárenský svaz, c2011 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/cng-info/statistiky.html>
- [3] Zemní plyn - těžba, vlastnosti a rozdělení. *OEnergetice* [online]. Třebíč: Jan Budín, 2015 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/zemni-plyn-tezba-vlastnosti-a-rozdeleni>
- [4] MATĚJOVSKÝ, Vladimír. Automobilová paliva. Praha: Grada, 2004. ISBN 978-80-247-6240-1.
- [5] ŘEHÁK, David. *Provozní bezpečnost motorových vozidel na zemní a ropný plyn*. [online]. Praha, 2011 [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/4532>. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Brně, Fakulta dopravní, Ústav soudního znaleství v dopravě. Vedoucí práce Tomáš Mičunek.
- [6] Zkapalněný zemní plyn (LNG). *OEnergetice* [online]. Třebíč: Jan Budín, 2015 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/plyn/zkapalneny-zemni-plyn-lng>
- [7] Plnění vozidel. *CNG4you* [online]. Praha: Český plynárenský svaz, c2011 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.cng4you.cz/stanice/informace-na-cesty/plneni-vozidel.html>
- [8] O LNG. *LNG* [online]. Ústí nad Labem: GASNET, c2020 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://lng.cz/o-lng.html>
- [9] LNG – Liquefied Natural Gas. *GASCONTROL* [online]. Havířov: GASCONTROL [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.gascontrol.eu/environmental-technology/lng/>
- [10] Čerpací stanice LNG. *Východočeské plynárenské strojírný* [online]. Rosice: Východočeské plynárenské strojírný, c2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.vpsr.cz/cerpaci-stanice-lng>
- [11] Vortex Cooling System- CNG. *Universal Vortex* [online]. West Windsor Township (Spojené státy americké): Universal Vortex, c2000-2016 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.universal-vortex.com/cngngvtankcoolingconditioning/tabid/367/default.aspx>
- [12] Joule-Thomson effect. *Britannica* [online]. Chicago: Encyclopædia Britannica, c2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Joule-Thomson-effect>
- [13] LAURIN, Josef. PLYNNÁ MOTOROVÁ PALIVA PRO SILNIČNÍ VOZIDLA V ČR. *Paliva* 6. 2014, 2014(3), 73-77.

- [14] Statistika LPG. *LPG Černošice* [online]. Praha: Jiří Kuchta, c1999–2012 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://lpg.cernosice.cz/index.php?page=stats.php&order=pocet>
- [15] V roce 2020 bylo v ČR registrováno přes 5 tisíc nových osobních elektrických vozidel. *Centrum dopravního výzkumu* [online]. Brno: Centrum dopravního výzkumu, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.cdv.cz/tisk/v-roce-2020-bylo-v-cr-registrovano-pres-5-tisic-novych-osobnich-elektrickyh-vozidel>
- [16] V Česku loni výrazně rostl počet nových vozů na LPG. *Hybrid.cz* [online]. Stará Boleslav: Chamanne, c2006-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/v-cesku-loni-vyrazne-rostl-pocet-novych-vozu-na-lpg>
- [17] LPG jako pohonná hmota. *Wapos* [online]. Vochoz: Wapos, c2014-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://www.prestavby-lpg-cng.cz/lpg-jako-pohonna-hmota>
- [18] Co je to LPG? *Hungas* [online]. Brno: HUNSGAS, c2012-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.hungas.cz/odborne-informace/co-je-to-lpg>
- [19] LETNÍ A ZIMNÍ SMĚS LPG. *LPG Obchod* [online]. Praha, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.lpg-obchod.cz/co-je-lpg/>
- [20] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Výkladový automobilový slovník*. 4., aktualiz. vyd. Brno: Computer Press, 2011. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 978-80-251-3725-3.
- [21] Provoz vozidla s LPG. *LPG Servis* [online]. c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://lpgservis.cz/vse-o-lpg/provoz-vozidla-s-lpg/>
- [22] LPG systémy: Popis LPG systémů. *Informace ze světa LPG* [online]. 2007 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: http://www.lpg.cz/lpgsystemy/lpgsystemy_popis.php
- [23] Typy LPG zařízení. *Auta na plyn* [online]. Zubří: AutoGasMOTORS, c2004 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://www.autanaplyn.cz/typy-lpg-zarizeni>
- [24] SEKVENČNÍ AUTOMATICKÝ LPG SYSTÉM. *Levně LPG* [online]. Praha: Tomáš Pour, c2014-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.levnelpg.cz/vse-o-lpg/technicke-info/sekvenni-automaticky-lpg-system-co-to-je/>
- [25] Systém sekvenčního vstřikování LPG pro motory MPI. *LPG profi* [online]. Holohlavy: Gasinsight, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.prestavbanalpg.cz/prestavba-lpg/typy-systemu-lpg/vstrikovani-lpg/>
- [26] Výrobci systémů LPG. *Neptun Harfa* [online]. Praha: Neptun Harfa, 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://www.neptun-harfa.cz/Vyrobci-systemu-LPG/3919.html>
- [27] Typy montovaných vstřikování LPG v All4Car. *Levné vození* [online]. Záriačie (Slovensko): All4car, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.levnevozeni.cz/typy-vstrikovani-lpg/>
- [28] LPG nádrže a výměna. *Neptun Harfa* [online]. Praha: Neptun Harfa, 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://www.neptun-harfa.cz/LPG-nadrze-a-vymena/3377.html>

- [29] Řídící jednotka. *Automotokout* [online]. Praha: Automotokout, c2015-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://www.automotokout.cz/prestavby-na-lpg/princip-lpg/ridici-jednotka/>
- [30] Function of the manifold pressure (MAP) sensor. *Delphi Auto Parts* [online]. Kirchheimbolanden (Německo): BorgWarner, 2019 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.delphiautoparts.com/gbr/en/resource-center/function-manifold-pressure-map-sensor>
- [31] REDUKTORY LPG. *LPG profi* [online]. Holohlavý: Gasinsight c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.lpgprofi.cz/reduktory-lpg>
- [32] Komponenty pro přestavbu. *Havel plyn* [online]. Studenec: HAVELplyn [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://autanaplyn.com/lpg/komponenty-pro-prestavbu/>
- [33] Přehled LPG a CNG vozů na českém trhu: Nejširší nabídku má Fiat. *Autobible* [online]. Praha: Internet Info, c2021, 14.3.2019 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/prehled-lpg-cng-vozu-ceskem-trhu-nejsirsi-nabidku-ma-fiat/>
- [34] Parkování a garážování vozidel s pohonem na LPG / CNG. *Šlápní na plyn* [online]. Praha: AbcRedakce [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://lpg-cng.ochranamotoru.cz/parkovani-garazovani-auta-na-plyn-lpg-cng.htm>
- [35] Servis a revize LPG / CNG zařízení. *AutoGas Centrum* [online]. Strakonice: AUTOGAS - CENTRUM, 2018 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.lpg-autogascentrum.cz/servis-a-revize-lpg/>
- [36] Plnění vozidel. CNG [online]. Praha: Innogy Energo, c2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.cng.cz/uzitecne-informace/plneni-vozidel>
- [37] Jak přesně funguje pohon na CNG? Náš redakční Seat Ibiza 1.0 TGI vám to ukáže. *Autobible* [online]. Praha: Internet Info, c2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/presne-funguje-pohon-cng-nas-redakcni-seat-ibiza-1-0-tgi-vam-ukaze/>
- [38] Nádrže na LPG a CNG a jejich výměna. *AutoGas Centrum* [online]. Strakonice: AUTOGAS - CENTRUM, 2018 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.lpg-autogascentrum.cz/nadrze-lpg-a-vymena/>
- [39] Osobní vozy. CNG+ [online]. České Budějovice: FT Sun, c2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.cngplus.cz/auta/osobni-vozy.html>
- [40] Bezpečnost a parkování. *Zemní plyn* [online]. Praha: Český plynárenský svaz, c2016 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.zemniplyn.cz/chci-jezdit-levne-a-ekologicky/bezpecnost-a-parkovani>
- [41] PŘEHLED VOZIDEL NA CNG. Motor Jikov CNG [online]. České Budějovice: MOTOR JIKOV Group, c2013 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <http://www.jikovcng.cz/o-cng/prehled-vozidel-na-cng/>

- [42] Vodík: vlastnosti, výroba a využití [online]. [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://web.vscht.cz/~nadhernl/projektIV/vodik.html>
- [43] Vodíkový palivový článek - pohon budoucnosti? *Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM Průmyslové spektrum, c2001-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vodikovy-palivovy-clanek-pohon-budoucnosti>
- [44] V Česku konečně vzniknou první vodíkové stanice. K dispozici budou v Praze, Litvínově i Brně. *Auto.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, c2001-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/v-cesku-konecne-vzniknou-prvni-vodikove-stanice-k-dispozici-budou-v-praze-litvinove-i-brne-136132>
- [45] Bezpečnost. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. Husinec-Řež: Česká vodíková technologická platforma, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/bezpecnost/482-bezpecnost>
- [46] Vodík jako prvek. *Anorganická chemie I* [online]. [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/sci/UChem/um/spchp/ch02s01.html>
- [47] Linde Gas: první vodíková čerpací stanice u nás je v provozu. *Technický týdeník* [online]. Praha: Business Media CZ, 2006 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/linde-gas-prvni-vodikova-cerpaci-stanice-u-nas-je-v-provozu_16208.html
- [48] Za posledních pět let se počet plnicích stanic H₂ ve světě ztrojnásobil, bude je mít i Česko. *Čerpačka* [online]. Praha: ATOZ Marketing Services, 2020 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.cerpacka.cz/2020/03/25/vodik-za-poslednich-pet-let-se-pocet-plnicich-stanic-ztrojnasobil-bude-je-mit-i-cesko/>
- [49] Výroba vodíku. *DEVINN s.r.o.* [online]. Jablonec nad Nisou: Devinn, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.devinn.cz/vyroba-vodiku/>
- [50] Výroba vodíku parním reformováním. *Petroleum* [online]. Praha: Ing. Daniel Maxa, Ph.D., c2007-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-43.aspx>
- [51] BRANDEJSKÁ, Eva, Ondřej PROKEŠ a Daniel TENKRÁT. *Ziskávání vodíku z obnovitelných zdrojů* [online]. Brno, 2006, 37-42 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/Sbornik-EnBio/2006/08%20-%20Brandejska.pdf>
- [52] Výroba vodíku. *Česká vodíková technologická platforma* [online]. Česká vodíková technologická platforma, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.hytep.cz/cs/vodik/informace-o-vodiku/vyroba-vodiku/664-vyroba-vodiku>
- [53] KŘEČEK, M. *Analýza využití vodíku v energetice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 40s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lukáš Radil
- [54] Jak se vyrábí palivo budoucnosti. Vodík pro auta i elektroniku. *IDnes.cz* [online]. Praha: MAFRA, c1999-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z:

- https://www.idnes.cz/technet/technika/jak-se-vyrabi-palivo-budoucnosti-vodik-pro-auta-i-elektroniku.A080127_234744_tec_tecnika_vse
- [55] H2 Stations Map. *Hydrogen refuelling stations worldwide* [online]. Ottobrunn (Německo): Ludwig-Bölkow-Systemtechnik, 2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.h2stations.org/stations-map/?lat=49.763948&lng=12.582221&zoom=4>
- [56] Schematický průběh elektrolýzy. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrol%C3%BDza#/media/Soubor:Elektrol%C3%BDza.jpeg>
- [57] Mapa CNG stanic. *CNG* [online]. Praha: Innogy Energo, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.cng.cz/stanice>
- [58] Vodík míří do Česka. Natankujete v Praze, Brně nebo Litvínově a z výfuků vám půjde jen pára. *Forbes* [online]. New York: MediaRey, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://forbes.cz/vodik-miri-do-ceska-natankujete-v-praze-brne-nebo-litvinove-a-z-vyfuku-vam-pujde-jen-para/>
- [59] Hythane. *Science Direct* [online]. Amsterdam (Nizozemsko): Elsevier, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/hythane>
- [60] Jak fungují auta na vodík a princip palivového článku. *Portál řidiče* [online]. Pardubice: DF SOLUTIONS, 2020 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.portalridice.cz/clanek/jak-funguji-auta-na-vodik-a-princip-palivoveho-clanku>
- [61] Toyota Mirai. *Toyota* [online]. Praha: Toyota Central Europe [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.toyota.cz/world-of-toyota/news/new-toyota-mirai>
- [62] 2020 Toyota Mirai. *Vehicle History* [online]. Las Vegas (Spojené státy americké): Vehicle History, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.vehiclehistory.com/report/toyota/mirai/2020/specs>
- [63] LPG Direct Injection. *BRC Gas Equipment* [online]. Strakonice: AUTOGAS CENTRUM PLUS, c1986-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.lpg-brc.cz/produkty/ldi>
- [64] Renault-Dacia Launches Sandero 1.4 LPG. *Motor 1* [online]. Miami (Spojené státy americké): MOTORSPORT NETWORK, c2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: <https://www.motor1.com/photo/319777/dacia-sandero-14-lpg-319777/>
- [65] Compressed hydrogen storage system. *Research Gate* [online]. Berlín (Německo): ResearchGate, c2008-2021 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Type-IV-70-MPa-compressed-gaseous-hydrogen-vessel_fig4_308420229
- [66] Audi introduces new CNG A3 Sportback. *Green Car Congress* [online]. Mill Valley (Spojené státy americké): BioAge Group, c2004-2021 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.greencarcongress.com/2020/09/20200916-audia3cng.html>

- [67] ŽÁKOVEC, Jan. Využití plyných paliv v dopravě. Praha: GAS, 2001. Informační systém GAS. ISBN 80-861-7686-X.
- [68] VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. Brno: František Vlk, 2006. ISBN 80-239-6461-5.
- [69] V Česku roste zájem o nákladní vozy na zkapalněný zemní plyn. *Hybrid.cz* [online]. Stará Boleslav: Chamanne, c2006-2021 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/v-cesku-roste-zajem-o-nakladni-vozy-na-zkapalneny-zemni-plyn>
- [70] Evidence vozidel DPMB. *Brněnská MHD* [online]. Brno, c2002-2021 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.bmhd.cz/evidence-dpmb/evidence.php>
- [71] Vozidla brněnské městské dopravy. *Dopravní podnik města Brno* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://dpmb.cz/cs/vozidla>
- [72] BEROUN, Stanislav. *Vozidlové motory: Studijní texty k předmětu motorová vozidla* [online]. Liberec: Technická univerzita v Liberci [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://old.kvm.tul.cz/studenti/skripta.htm>
- [73] Výkon spalovacího motoru. *Ústav techniky a automobilové dopravy* [online]. Brno: Mendelova univerzita v Brně, c2016 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://web2.mendelu.cz/autozkusebna/html/vykon.htm>
- [74] PAVLIČÍK, L. *Sací potrubí jednoválcového motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 100 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Svída, Ph.D..
- [75] DRDLA, Pavel. CNG A JEHO VYUŽITÍ V OSOBNÍ DOPRAVĚ. *Drdla - CNG a jeho využití v osobní dopravě* [online]. 2008, 3(5), 75-80 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/328170978.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

^1H		Protium
^2H		Deuterium
^3H		Tritium
CH_4		Metan
C_2H_6		Ethan
C_3H_8		Propan
C_4H_8		Buten
C_4H_{10}		Butan
C_5H_{10}		Pentan
C_5H_{12}		Penten
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$		Glukóza
CO		Oxid uhelnatý
CO_2		Oxid uhličitý
CNG		Compressed Natural Gas – stlačený zemní plyn
DISi		Direct Injection Spark Ignition – přímé vstřikování
EOBD		European On Board Diagnostic – evropská palubní diagnostika
FSI		Fuel Stratified Injection – přímé vstřikování
GDI		Gasoline Direct Injection – přímé vstřikování
H^+		Vodíkový kationt
H_2		Vodík
H_2O		Voda, případně vodní pára
H_2S		Sulfan
i	[-]	Taktnost motoru
LCNG		Liquid to Compressed Natural Gas – kapalný stlačený zemní plyn
LNG		Liquefied Natural Gas – zkapalněný zemní plyn
LPG		Liquefied Petroleum Gas – zkapalněný ropný plyn
MAP senzor		The Manifold Absolute Pressure senzor – snímač absolutního tlaku v sacím potrubí
MPI		Multi Point Injection – vícebodové vstřikování
n	$[\text{min}^{-1}]$	Otáčky motoru
N_2		Dusík
NGV1		Natural Gas Vehicle – typ plnicího ventilu

NGV2		Natural Gas Vehicle – typ plnicího ventilu
NiO		Oxid nikelnatý
NO _x		Oxidy dusíku
O ₂		Kyslík
OBD II		On Board Diagnostic – palubní diagnostika používaná od roku 1996 v USA
p _e	[Pa]	Efektivní tlak
P _e	[W]	Efektivní výkon
p _i	[Pa]	Induktivní tlak
P _i	[W]	Induktivní výkon
Tce		Turbo Control Efficiency – přepínaný motor Renault
TFCS		Toyota Fuel Cell System – systém palivových článků
TFSI		Turbo Fuel Stratified Injection – turbodmychadlem přepínané motory
TSI		Twincharged Stratified Injection – přímé vstřikování
V _z	[m ³]	Zdvihový objem
W _i	[J]	Indikovaná práce oběhu
z	[-]	Počet válců
η _m	[-]	Mechanická účinnost motoru

SEZNAM PŘÍLOH

1. MATLAB[®] skript s názvem: ZazehovyMotorIdeal_CNG01
2. MATLAB[®] skript s názvem: VznetovyMotorIdeal_Nafta01