

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Diplomová práce

**Analýza provozních parametrů vozidla provozovaného na
LPG palivo**

Autor práce: Bc. Petr Čuhel

Vedoucí práce: Ing. Patrik Prikner, Ph.D.

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Petr Čuhel

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Analýza provozních parametrů vozidla provozovaného na LPG palivo

Název anglicky

Analysis of the operational parameters of the vehicle on LPG fuel.

Cíle práce

Hlavním cílem práce je posoudit vliv alternativního paliva LPG na provozní parametry vozidla. Dílčím cílem bude ekonomická analýza provozu vozidla s přestavbou na LPG palivo, jako jsou náklady na přestavbu, provoz a údržbu. Závěrečná část práce bude obsahovat doporučení autora.

Metodika

1. Vypracování literární rešerše na základě doporučené vědecké literatury a dalších technických podkladů.
2. V rámci metodiky bude představení současného trendu využití alternativního paliva vozidel se zážehovým motorem podle nejnovější dostupné literatury, technické specifikace a rozbor všech provozních parametrů.
3. Na základě metodiky budou zvoleny specifické testovací podmínky v nichž budou monitorovány a porovnány konkrétní kombinace významných parametrů a vyhodnoceny na základě měření v provozních podmínkách.
4. V diskuzi bude proveden rozbor a zhodnocení získaných podkladů v kontextu soudobé technické úrovně vozidel, zahrnující ekonomickou analýzu provozu vozidla.
5. Závěrečná část práce bude obsahovat možná doporučení autora.
6. Seznam použitých zdrojů
7. Přílohy

Doporučený rozsah práce

cca 50 stran včetně obrázků a tabulek

Klíčová slova

zážehový motor, LPG, technické parametry motoru, provozní náklady

Doporučené zdroje informací

C. Arcoumanis · T. Kamimoto : Flow and Combustion in Reciprocating Engines, Springer-Verlag Berlin, Heiderberg, 2009

F. ZHAO, M.-C. LAI, D.L. HARRINGTON: Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines, Pergamon, 2000

S Lee, JG Speight, SK Loyalka: Handbook of alternative fuel technologies, Taylor & Francis Inc., 2014

Štěrba, P.: Automobily s pohonem na LPG. Computer Press, Brno 2013

Štěrba, P., Kryžický, Ondřej: Jak na LPG: přestavba, provoz a údržba automobilů na plyn. Computer Press, Praha. 2002

Předběžný termín obhajoby

2022/2023 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Patrik Prikner, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 18. 1. 2023

doc. Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 8. 2. 2023

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 22. 02. 2023

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Analýza provozních parametrů vozidla provozovaného na LPG palivo“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 31. 3. 2023

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Patrik Priknerovi, Ph.D., za ochotu, pomoc a cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval doc. Ing. Martin Pechoutovi, Ph.D. a Bc. Jakubovi Adamovi za odborné informace k měření parametrů, které mi pomohly zpracovat praktickou část této práce.

Analýza provozních parametrů vozidla provozovaného na LPG palivo

Abstrakt

Cílem diplomové práce je zhodnotit vliv alternativního paliva na změnu technických parametrů a emisí u testovaného vozu Land Rover Range Rover rok výroby 2004 s motorem o zdvihovém objemu 4 398cm³. Analýza porovnává původní palivo Natural 95 s alternativním LPG (zkapalněný ropný plyn). Teoretická část diplomové práce popisuje vlastnosti LPG z hlediska výhodnosti použití a jeho zařazení do běžného provozu vozidel na pozemních komunikacích. Rozbor se současně zaměřuje na alternativu BIO LPG a jeho využití v provozu formou příměsí do originálního LPG. V metodické části práce je popis jednotlivých zkoumaných parametrů (produkce emisí, spotřeba paliva, výkon motoru). Nezbytnou částí diplomové práce je ekonomický rozbor, uvádějící výhodnost provozu vozidla na LPG i s ohledem na úsporu nákladů na pohonné hmoty a nezbytnou údržbu testovaného vozidla.

Klíčová slova

zážehový motor, LPG, technické parametry motoru, provozní náklady

Analysis of the operational parameters of the vehicle on LPG fuel.

Abstract

The aim of this master's thesis is to evaluate the influence of alternative fuel on the variability of technical parameters and emissions in the tested vehicle Land Rover Range Rover, year of manufacture 2004, with a 4398 cm³ litres engine. The analysis compares the original Natural 95 fuel with the alternative LPG (Liquefied Petroleum Gas). The theoretical part of the diploma thesis describes the properties in terms of the convenience of use and implementation in normal road traffic. The analysis also focuses on the BIO LPG alternative and its use as an admixture to original LPG. The methodological part of the work contains a description of the individual investigated parameters (production of emissions, fuel consumption and engine power). An essential part of the diploma thesis is an economic analysis, stating the advantages of running a vehicle on LPG and saving fuel costs and the necessary technical maintenance of the tested vehicle.

Keywords

gasoline engine, LPG, engine technical parameters, operating costs

Obsah

1 ÚVOD	9
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	10
2.1 Světový progres využití alternativních paliv	10
2.2 Problematika alternativního paliva - LPG	14
2.3 Příprava dodávky LPG do spalovacího prostoru	17
2.4 Trend vývoje LPG v dnešní době a budoucnosti	20
2.5 Elektřina vs. BIO LPG	21
3 POPIS SYSTÉMU MAGIC 2 G4 A JEHO PRVKŮ.....	22
3.1 Plnicí hrdlo	22
3.2 Nádrž na LPG	24
3.3 Přepínač a ukazatel stavu paliva	25
3.4 Reduktor LPG	26
3.5 Vstřikovače	26
3.6 Řídící jednotka	28
3.7 Vedení plynu	28
3.8 Filtry kapalné a plynné fáze.....	29
3.9 Odborná doporučení ohledně přestavby a provozu vozidla s LPG palivem.....	30
4 CÍL PRÁCE.....	32
5 METODIKA MĚŘENÍ.....	33
5.1 Měření výkonu.....	33
5.2 Měření emisí statickou metodou	33
5.3 Měření emisí dynamickou metodou reálném provozu	34
6 NAMĚŘENÉ HODNOTY A VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	38
6.1 Měření efektivního výkonu a točivého momentu	38
6.2 Měření statických emisí	40
6.3 Měření dynamických emisí v reálném provozu	40
6.4 Závěr naměřených hodnot	45
7 EKONOMICKÁ ČÁST	46
7.1 Počáteční investice.....	46
7.2 Výpočet celkové úspory nákladů na pohonné hmoty od přestavby vozidla.....	48
7.3 Závěr ekonomické části.....	49
8 DISKUSE A MOŽNÁ DOPORUČENÍ AUTORA	50
9 ZÁVĚR	52
10 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	54
11 SEZNAM OBRÁZKŮ	60
12 SEZNAM TABULEK	60

1 Úvod

V dnešní době je důležité věnovat pozornost ekologičnosti použití různých paliv v dopravě a je třeba hledat alternativu za současná fosilní paliva (benzín, motorová nafta). Tato práce se věnuje především typu paliva LPG (Liquid Petroleum Gas). I když je v současné době většina LPG vyráběná jako vedlejší produkt při rafinaci ropy, použití této fosilní alternativy snižuje uhlíkovou stopu vozidla vybaveného palivovým systémem pro využití LPG. Budoucnost LPG spočívá také v tom, že se už v současné době běžně vyrábí BIO LPG jako vedlejší produkt Bio dieselu, Bio benzínu a bioodpadu. Analýza provozních parametrů byla provedena na vozidle Land Rover - Range Rover, rok výroby 2004 s benzínovým motorem o zdvihovém objemu 4 398cm³. V diplomové práci je rovněž vysvětleno ekonomické hledisko provozu tohoto vozidla s použitím alternativního paliva. Je zde popsán celý systém LPG Magic 2 G4, který je nainstalován v testovaném vozidle od roku 2020. Získané parametry budou porovnány s originálním benzínovým systémem vozidla a provedeno vyhodnocení možných odlišností od standardních údajů a publikovaných závěrů na toto téma v odborné literatuře.

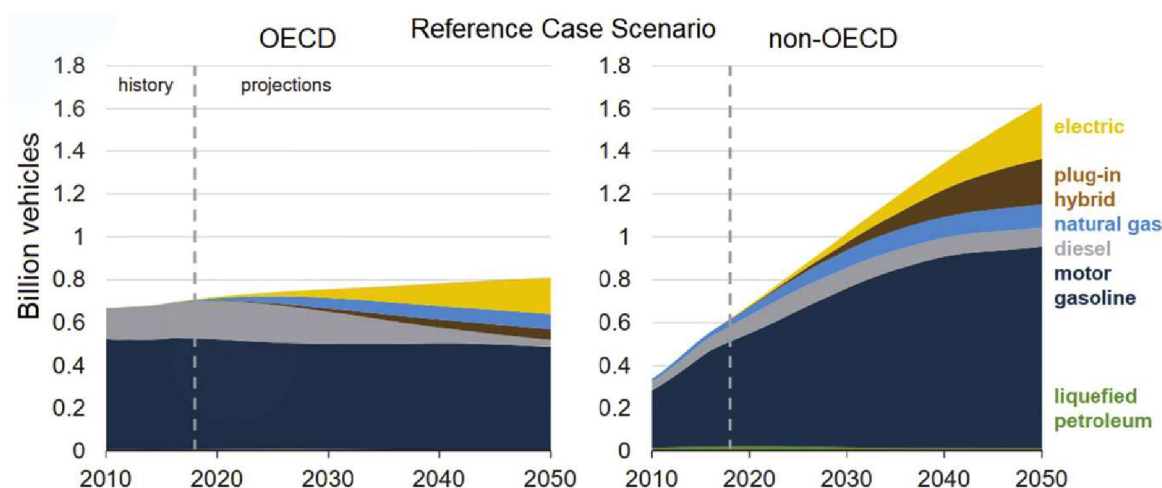
2 Současný stav problematiky

Vzhledem k ekologickým problémům a stále se prohlubující energetické krizi se neustále posiluje povědomí lidí o ochraně životního prostředí, vytápění účinnými alternativními palivy a vývoj zdrojů nové energie se stal primární i v oblasti spalovacích motorů. Existují dva hlavní důvody pro používání alternativních paliv v sektoru dopravy. První - snížení závislosti na tradičních ropných palivech a druhé - snížení škodlivých emisí produkující spalovací motory [1].

Používání moderních vozidel vychází z více než 130 let staré historie, zatímco fosilní paliva byla využívána jako hlavní zdroje energie. Od té doby se vynálezci a výzkumníci pokoušeli nahradit fosilní paliva některými omezenými alternativami, například etanolem. Nedosáhli však příliš dobrého úspěchu kvůli méně rozvinutým dostupným technologiím a zároveň i nízké úrovni znečištění ovzduší a emisí skleníkových plynů (v porovnání s dneškem). Proto hlavním zdrojem zůstala fosilní paliva. Také technologie pro výrobu vozidel s alternativním palivem (VAP), používané v posledních letech, jsou rozvinutější než dříve, což způsobuje generování několika typů VAP, jako je palivo obdržené z přírodních zdrojů, plyn, hybridní pohon, elektrická vozidla a další využití palivových článků [2].

2.1 Světový progres využití alternativních paliv

Údaje v globálním dopravním sektoru (více než 70 % u vozidel [3]) však ukazují, že počet VAP dostupných v současnosti, a dokonce i v blízké budoucnosti (predikce do roku 2050 jako cílový rok nulových čistých emisí z hlediska skleníkových plynů v mnoha zemích [4]), není tak vysoký jako množství potřebné ke snížení znečištění ovzduší a závislosti na používání benzinových a naftových vozidel. A navzdory nárůstu používání alternativního paliva pro vozidla (zejména elektřina a zemní plyn), benzín a nafta jsou a pravděpodobně budou hlavními zdroji energie pro sektor dopravy v posledních letech i v blízké budoucnosti s predikcemi minimálně až do roku 2050, (viz. obr. 1), [5].



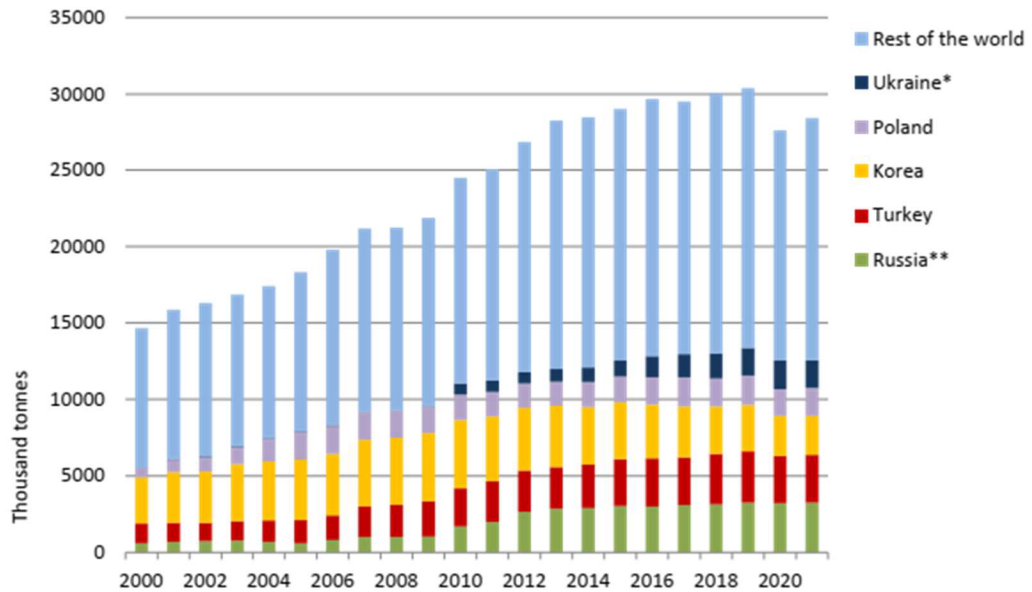
Obrázek 1: Globální predikce počtu vozidel podle typu paliva pro osobní a lehká užitková vozidla. (Energy Information Administration (EIA), Annual Energy Outlook 2018 with Projections to 2050; zdroj: [5], upraveno).

Primárním kritériem výberu pro volbu jakékoli alternativy je, že palivo musí být běžně dostupné nebo ještě lépe čerpané z obnovitelných zdrojů energie, musí obsahovat dostatečné množství specifické energie, snadné skladování a přepravu, minimální znečištění a vyčerpání zdrojů životního prostředí a konečně musí být kvalitní s bezpečnými manipulačními vlastnostmi [6].

Mnoho alternativních paliv, která jsou vhodná pro benzinové motory, lze rozdělit do následujících kategorií: průmyslový benzin, líh a plynná paliva. Stejně jako bionafta získávaná ze živočišných tuků získávaná pomocí esterifikace odpadních tuků skotu, ovcí a kuřat nevyužitých v sektoru výživy a dále rostlinná bionafta, lze vyrobit amylalkohol z různých rostlinných olejů, jako je sójový, řepkový, světlicový a odpadní rostlinné oleje [7] nebo pentanol [8]. Palivo lze vylepšit přidáním některých aditiv, jako je ethylhexylnitrat (EHN), DieselFX (DFX), Fussel Oil, octamix (získaný smícháním triborátu - zdroje boru a čpavkového boru jako zlepšujícího vodíku a etylalkoholu) popř. přidáním různých množství oxidu grafenu [9]. Plynná paliva jsou díky svým nízkým cenám, lepším oktanovým hodnotám, vyšším výhřevnostem a menším škodlivým emisím výfukových plynů slibným alternativním palivem [10]. O využití LPG jako alternativního paliva v zážehových motorech je stále rostoucí zájem, protože je šetrnější k životnímu prostředí než benzin. Má nízký poměr uhlík/vodík, je extrémně čistý, nemá žádnou toxicitu ani korozivní účinky a neobsahuje aromatické uhlovodíky [11].

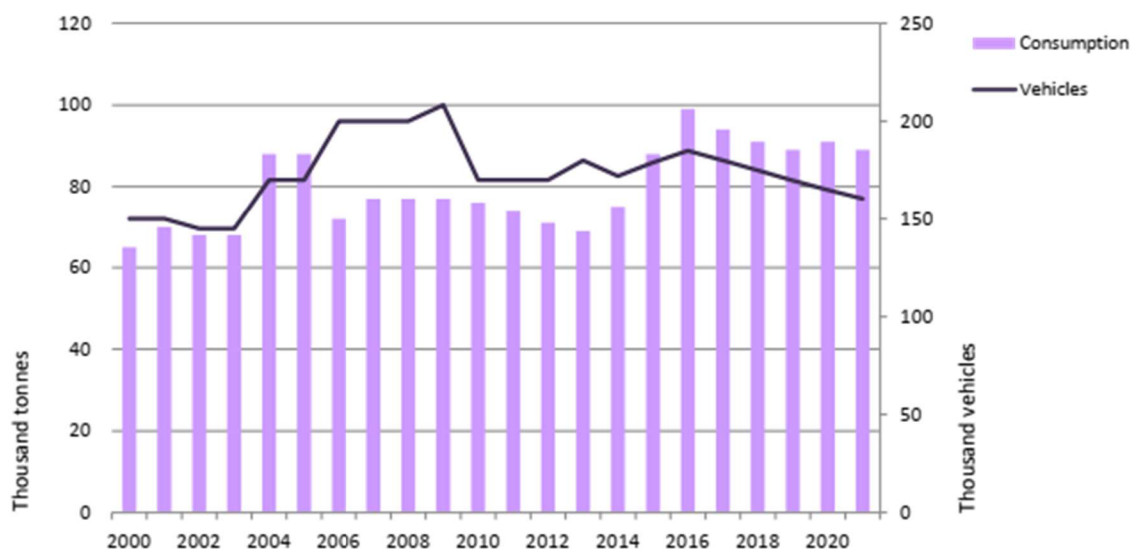
V současné době v Evropě pohání LPG přibližně 7 milionů osobních automobilů a je tak nejrozšířenějším alternativním palivem, které nabízí řadu specifických výhod. S ohledem na specifické vlastnosti propanu se ideálně hodí pro současný trend vývoje v oblasti energetiky, v souvislosti s ekonomickou a ekologickou politikou, kdy Evropa čelí výzvě pro optimální vyvážení požadavků na bezpečnost, udržitelnost a konkurenceschopnost [12]. Jako ekologické a ekonomické palivo může zkapalněný ropný plyn pomoci minimalizovat dopad silniční dopravy na klima, počasí, přírodní zdroje a lidské zdraví [13]. Různé atributy přispívají k tomu, že se jedná o progresivní alternativu jako součást rozmanitého a udržitelného energetického mixu v dopravě. Trh EU-27 se zkapalněným ropným plynem zůstává v důsledku svého rozvoje nevyrovnaný s velkou mírou nevyužitého potenciálu [14].

Výkyvy v posledních dvou letech zakrývají některé výrazné rozdíly v základních trendech úspory paliva. Zejména pak zmenšování LPG vozového parku, které vede ke snížení spotřeby na některých hlavních trzích. Nicméně, některé trhy pokračují v expanzi v důsledku konkrétních vládních opatření, jenž zohledňují konkurenceschopnost tohoto paliva. LPG je z hlediska velikosti vozového parku nejrozšířenější nemíchanou alternativou v porovnání s konvenčním palivem na bázi ropy (benzín a nafta). Celosvětová spotřeba LPG se během prvních dvou desetiletí tohoto století neustále zvyšovala a v roce 2019 dosáhla nového maxima 27,1 milionu tun, ale v roce 2020 klesla o 10 % spolu s poklesem používání jiných druhů paliv v dopravě i v důsledku hospodářského narušení způsobeného pandemií COVID-19 (viz. obr. 2). Poptávka se v roce 2021 zvýšila přibližně o 3 % na 25,1 milionů tun, než se ekonomická aktivita začala opět vracet postupně k normálu [15].

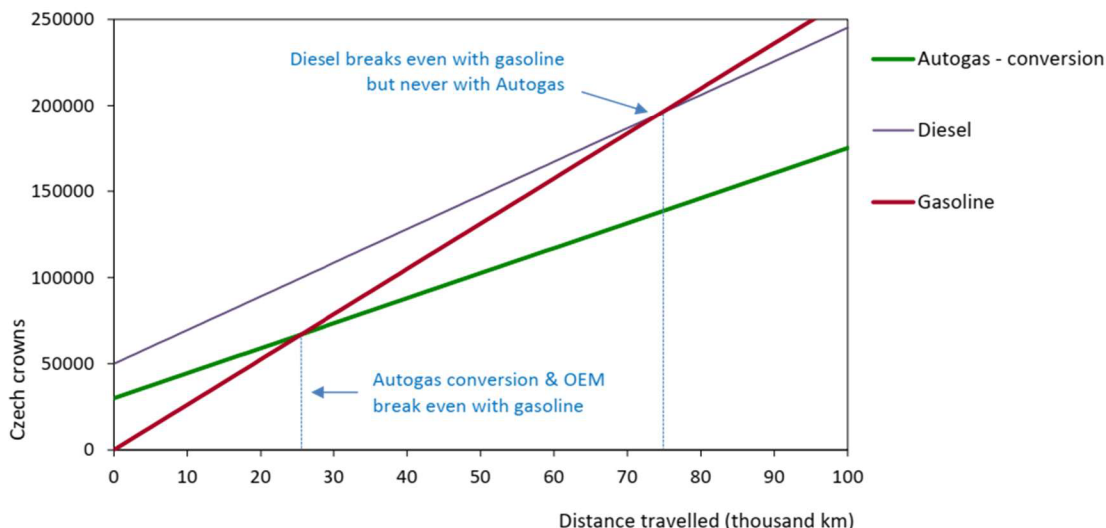


Obrázek 2: Světová spotřeba LPG v období 2000 – 2021, (zdroj: Liquid Gas Europe, 2022. Autogas Incentive Policies report. World LPG Association (WLPGA) and Liquid Gas Europe, Brussels, 149 pp; (zdroj [15], upraveno).

Nicméně celosvětově úspěšný vývoj, včetně České republiky (viz. obr. 3 a 4), poukazuje na stěžejní požadavek pro sektor veřejné politiky prosadit LPG jako klíčový prvek energetického portfolia pro sektor silniční dopravy, a rovněž garantující významné socioekonomické a environmentální přínosy [15].



Obrázek 3: Celková spotřeba LPG a celkový počet nových vozidel v České republice v období 2000 – 2021, (zdroj: Liquid Gas Europe, 2022. Autogas Incentive Policies report. World LPG Association (WLPGA) and Liquid Gas Europe, Brussels, 149 ; (zdroj [15], upraveno).



Obrázek 4: Porovnání rentability při použití LPG oproti ostatním typům paliva v České republice v období 2000 – 2021, *Liquid Gas Europe, 2022. Autogas Incentive Policies report. World LPG Association (WLPGA) and Liquid Gas Europe, Brussels, 149, pp; (zdroj [15], upraveno).*

2.2 Problematika alternativního paliva - LPG

Použití LPG paliva však vyžaduje podrobnější zkoumání vlastností tohoto alternativního paliva a specifikovat odlišnosti při jeho použití [16]. Většina automobilových motorů poháněných plynem byla původně navržena pro provoz na benzín. Z tohoto důvodu se při správném seřízení motoru pro provoz na náhradu benzínu objevují určité potíže. Konvenční spalovací motory používané v automobilech se vyznačují individuálními vlastnostmi, proto zatím neexistují žádné systémy plynových zařízení, ideálně vhodné pro konkrétního výrobce motorů. Při používání LPG se vždy vyskytují problémy, jako jsou ztráty výkonu, úprava složení výfukových plynů atd. [17, 18].

LPG je plyn sestávající převážně z propanu a butanu, kromě toho, že může rovněž obsahovat různé uhlovodíky, jako je propan a n-butan v různých množstvích. Je stlačen pouze na 0,5 - 2 MPa a funguje spolehlivě jako alternativní palivo v zážehových motorech [19]. Je bez zápachu a z bezpečnostních důvodů byl bez zápachu přidán pro detekci nezjištěných úniků, které by mohly vést k nebezpečným situacím, protože LPG je těžší než vzduch [20]. LPG má nízký poměr uhlík / vodík, je extrémně čistý, nemá žádnou toxicitu ani korozivní účinky a neobsahuje aromatické uhlovodíky, vysoké oktanové číslo (110+), které umožňuje dosáhnout kompresního poměru až 15:1, což je u zážehových motorů v rozmezí 8:1 - 9,5:1. Dalším klíčovým pozitivem je velká celosvětová rezerva plynu, vysoká výhřevnost a nízké emise ze spalování, navíc i jejich nižší cena ve srovnání

s benzínem. LPG má vyšší teplotu vznícení než benzín, což zpožďuje samovznícení paliva a zabraňuje tak klepání [21].

G.H. Choi a kol. [22] vyhodnotili spalovací a emisní charakteristiky LPG ve standardním zážehovém motoru modifikovaného na LPG palivo s proměnlivým podílem LPG (5 %, 10 %, 20 %). Otáčky motoru byly pevně nastaveny na 4000 min⁻¹ a poměr vzduch/palivo (λ) se pohyboval v rozmezí (0,8 – 1,3). Bylo také pozorováno, že maximální emise CO_2 jsou přibližně pro $\lambda=1$ a vykazují menší podíly v bohatých a chudých směsích. Zvýšení procenta LPG v benzínu výrazně zvyšuje rychlost spalování směsi a tím zkracuje dobu spalování, tím se pak zvyšuje i maximální teplota uvnitř válce. Při vysokém poměru paliva a vzduchu bylo množství naměřených oxidů dusíku NO_x mnohem vyšší a HC vykazovalo znatelný pokles, protože relativní poměr paliva a vzduchu přesáhl stechiometrický poměr.

Mustafa K. F. a Gitano-Briggs H.W. [23] zkoumali experimentální studii vlivu použití směsi LPG a benzínu v různých poměrech (0 %, 5 %, 10 % a 20 %) na výkonnostní a emisní charakteristice čtyřdobého zážehového motoru. Výsledky studie při kompresním poměru 6,3:1 ukázaly snížení výkonu a točivého momentu motoru a zlepšení měrné spotřeby paliva motoru při použití směsi LPG a benzínu ve srovnání s pouze benzínovým motorem. Výsledky také ukázaly, že emise CO , CO_2 , HC a NO_x jsou nižší než u originálního benzínového motoru.

Gumus M. [24] studoval vliv rozdílu v objemové účinnosti na emisní charakteristiky zážehového motoru s použitím LPG v různých poměrech (25, 50, 75 a 100 %). Experimenty byly prováděné při konstantních otáčkách 3800 min⁻¹ a s různou zátěží 5, 30, 60 a 90%. Byly zkoumány rozdíly v tepelné účinnosti paliva, poměru vzduch/palivo, měrné spotřeby paliva a složení výfukových plynů. Při použití LPG se výrazně snižuje objemová účinnost. Poměr vzduchu a paliva klesá s rostoucí úrovní spotřeby LPG. Měrná spotřeba paliva je snížena při zachování tepelné účinnosti. Z hlediska emisí výfukových plynů byly dosaženy pozitivní výsledky na všech úrovních spotřeby LPG. Při použití 100% LPG pro výfukové emise, dosahují se nejlepších výsledků.

Pipitone E. a Beccari S. [25] zkoumali spalovací charakteristiky a emise dvoupalivového zážehového motoru pracujícího se směsí LPG a benzínu. Bylo provedeno porovnání s čistým benzínem za různých provozních podmínek zatížení, otáček a směšovacích poměrů. Výsledky ukázaly, že přidání LPG do benzínu zvyšuje účinnost

motoru a účinně zvyšuje odolnost motoru proti klepání a byla zaznamenána jak snížení spotřeby paliva, tak redukce emisí.

Abdulhaleem S.M a Mohammed H.A. [26] studovali vliv přidávání paliva LPG v různých poměrech k benzínu na průběh výkonu motoru a rozbor emisí znečišťujících látek. Experimenty byly prováděné na zážehovém motoru za různých podmínek zatížení, pro konstantní kompresní poměr (6:1) a pro různé směšovací poměry 10 – 25%. Výsledky ukázaly, že směs LPG zlepšuje termickou účinnost, měrnou spotřebu paliva a snižuje CO , CO_2 a NO_x , ale zvyšuje koncentraci uhlovodíků.

Mustaffa N. a kol. [27] studovali charakteristiky zážehového čtyřdobého motoru využívajícího jako alternativní palivo LPG a porovnávali výsledky s použitím bezolovnatého benzínu. Experimenty byly prováděny při konstantních otáčkách motoru 3000 min^{-1} a při různých zatíženích. Výsledky analýzy ukázaly, že LPG produkuje vyšší tlaky uvnitř válce v porovnání s bezolovnatým benzínem. Rychlost uvolňování tepla u LPG byla vyšší než pro bezolovnatý benzín. Výsledky dále ukázaly, že střední efektivní tlak a točivý moment byly vyšší pro LPG než pro bezolovnatý benzín. Měrná spotřeba paliva pro vstřikování LPG je ve srovnání s bezolovnatým benzínem nižší. Současně ale byly obdrženy vyšší emise u LPG než pro benzín.

Mustaffa N. a kol. [28] studovali účinky vstřikování LPG na stabilitu spalování ve srovnání s benzínem. Studie byla provedena s použitím motoru o zdvihovém objemu 1600 cm^3 při otáčkách 2000 a 3000 min^{-1} pro různé polohy škrticí klapky, které byly postupně nastavené na 25, 50, 75 a 100 % jeho maximálního otevření. Výsledky ukázaly, že vstřikování LPG produkovalo lepší stabilitu spalování než benzínová paliva téměř ve všech testovaných podmínkách.

Usman M a Nayat N [29] studovali zhoršení kvality mazacího oleje pro motocyklové motory o zdvihovém objemu 125 cm^3 na LPG a benzín. Výsledky ukázaly identické zhoršení mazacího oleje při provozu motocyklu na oba druhy paliv. Točivý moment a maximální rychlost motocyklu poháněného LPG byly nižší ve srovnání s benzínem a současně nižší produkce emisí CO , CO_2 a HC z LPG v porovnání s benzínem.

Simsek S. a kol. [30] zkoumali vliv benzínu, bioplynu a LPG paliv s různými objemovými poměry na výkon a výfukové emise při různých polohách škrticí klapky zážehového motoru. Výsledky ukázaly, že při použití bioplynu a LPG a plné dodávce paliva byl nárůst měrné spotřeby paliva o 75,52 % a 34,19 % ve srovnání s použitím benzínu,

zatímco byl zjištěn pokles tepelné účinnosti o 16,04 % a 8,95 %. V režimu polohy 50 % škrticí klapky se měrná spotřeba paliva zvýšila o 85,2 % a 45,51 %, zatímco tepelná účinnost se snížila o 33,43 % a 20,22 %. Oba režimy škrticí klapky navíc vykazovaly nižší emise u obou paliv ve srovnání s benzínem.

Adegboye T. a kol. [31] porovnávali výfukové emise benzínu a LPG pomocí analyzátoru výfukových plynů Kane Auto, který měří emise CO , CO_2 a HC . Testovaným motorem je jednoválcový zážehový přenosný generátor s dvojitým karburátorem. Emise byly zaznamenány pro různá zatížení od 0–1200 W pro obě paliva. Výsledky ukazují, že pro LPG emise CO_x a HC byly vyšší než u benzínu. Emise HC u LPG při chodu naprázdno a při nízkém zatížení byly velmi vysoké a emise CO_2 u benzínu byly vyšší než u LPG.

Arabaci E. [32] studoval experimentálně vliv kompresního poměru, poměru zdvih/vrtání a ekvivalentního poměru benzinového a LPG motoru na efektivní výkon motoru. Byla vytvořena simulace motorů pomocí termodynamické metody s konečným časem. Bylo zjištěno, že pokud objemová účinnost klesne o 10 % při použití LPG, energie obsažená v palivu se sníží o 12 %. Přestože je měrná spotřeba paliva LPG vyšší než u benzínu, měrné náklady na palivo u LPG jsou mnohem nižší než u benzínu vzhledem k poměru ceny LPG/benzín, takže provoz motoru na LPG je v porovnání s benzínem ekonomičtější. Ztráta výkonu se snižuje se zvyšujícím se kompresním poměrem a snižujícím se poměrem zdvih/vrtání. Ztráty výkonu se také zvýší, je-li poměr ekvivalence větší než 1. Ztráty výkonu LPG lze eliminovat zvýšením objemové účinnosti nebo zvýšením kompresního poměru.

Simsek S. a kol. [33] zkoumali optimální poměr LPG a zatížení motoru pro efektivní využití z hlediska výkonu a emisí u zážehového motoru se směsí benzínu a LPG pomocí metody „Response Surface Methodology“ (RSM). Data požadovaná pro model RSM byla převzata z experimentů provedených s pěti různými poměry LPG (0, 25, 50, 75 a 100 %) a třemi různými zatíženími motoru (2000, 2500 a 3000 W). Výsledky studie ukázaly, že optimální poměr LPG a zatížení motoru byl 35 % při 2400 W. Rovněž bylo zmíněno, že přidání LPG do benzínu může snížit veškeré emise, ale zároveň negativně ovlivnit termickou účinnost a měrnou spotřebu paliva.

2.3 Příprava dodávky LPG do spalovacího prostoru

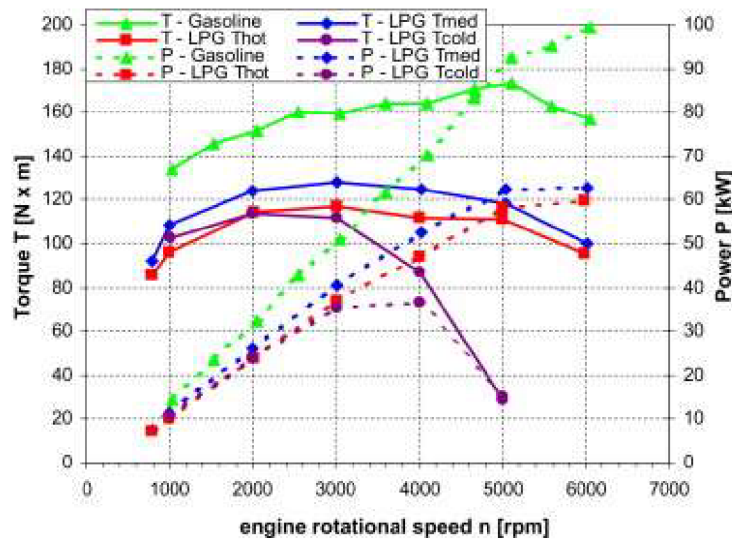
Systémy dodávky paliva v zážehových motorech se rychle vyvíjejí. Účelem je snížit spotřebu paliva a současně zvýšit výkon motoru a zároveň minimalizovat znečištění

životního prostředí [34]. Rozmanitost systémů dodávky benzínu odpovídajícím způsobem určuje konstrukci systémů dodávky LPG. Hlavní faktory ovlivňující odlišnosti procesů ve spalovacích motorech na LPG a benzin lze definovat [35]:

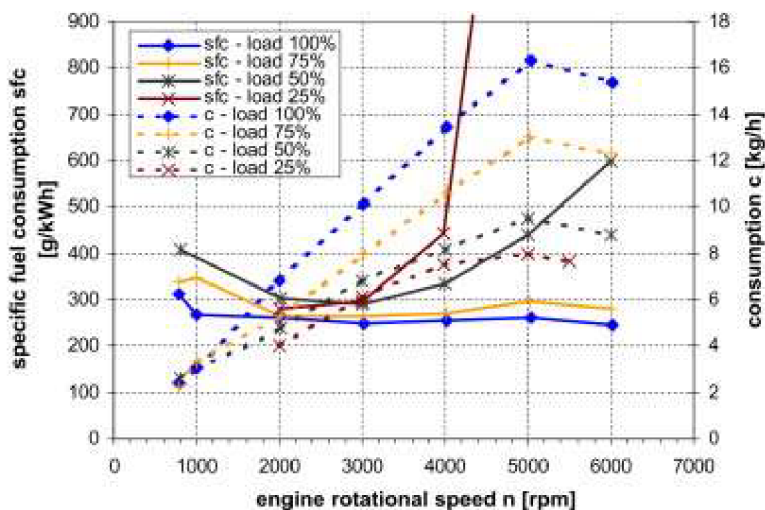
- Konfigurace sacího systému;
- Kompresní poměr;
- Časování zapalování;
- Teplota a relativní vlhkost okolí (nasávaný) vzduch;
- Tlak nasávaného vzduchu.

Jedním z problémů benzínových motorů jsou potíže s rovnoměrnou distribucí paliva u víceválcových motorů, která je řešena změnou tvaru sacího potrubí, vývojem systémů tvorby palivové směsi a specifikací jejich řídicích algoritmů [36]. Hlavním účelem efektivního využití LPG je minimální změna spotřeby paliva po změně typu paliva. Při aplikaci tohoto kritéria často dochází k tvorbě směsi paliva se vzduchem, kdy ve vyšších oblastech otáček motoru je obvykle příliš chudá, což se projevuje zejména při použití plynových zařízení starších 1. a 2. generace. U vznětových motorů v otáčkovém režimu při velmi chudé směsi mohou být pozorované potíže se zapalováním, zhasením plamene a nedokončeným spalovacím procesem [37], to jsou hlavní příčiny obrovského nárůstu úrovně emisí.

Výrobci vyvíjejí nové technologie ke zlepšení výkonu při nízké spotřebě paliva a debatují o výhodách LPG v porovnání s moderními benzínovými motory. Je třeba poznamenat, že u zážehových motorů na LPG došlo poklesu maximálního výkonu v průměru až o 20 % ve srovnání s bezolovnatým benzinem [38, 18]. To je ovlivněno především nižší rychlostí plamene LPG ve srovnání s bezolovnatým benzinem (viz. obr. 5-6).



Obrázek 5: Porovnání průběhů točivého momentu a efektivního výkonu pro benzín a LPG při odlišných teplotách paliva; (zdroj: [18], upraveno).



Obrázek 6: Porovnání průběhů měrné a hodinové spotřeby paliva při různých režimech zatížení motoru pro benzín a LPG; (zdroj [18], upraveno).

Přestože směs 60 % propan - 40 % butanu má vyšší výhřevnost než benzín (cca $43,448 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), motor poháněný LPG produkuje nižší hodnoty středního efektivního tlaku v porovnání s benzínem. Toto snížení lze přičíst nižší hustotě směsi paliva a vzduchu v důsledku jejich vyššího stechiometrického poměru vzduch-palivo.

2.4 Trend vývoje LPG v dnešní době a budoucnosti

Složení LPG (Liquid Petroleum Gas) je v České republice upraveno normou ČSN EN 589, která platí od srpna 2019. LPG je vedlejším produktem při rafinaci ropy nebo zemního plynu, proto je také výrazně levnější než benzín. Z tohoto důvodu s ním také nelze počítat do daleké budoucnosti, stále se jedná o produkt fosilního paliva. Bio LPG, které bylo uvedeno na trh v roce 2018, by mohlo být uvažováno pro budoucnost, nejen že má stejné vlastnosti jako LPG, ale vyrábí se jako vedlejší produkt při tvorbě BIO dieselu a rostlinných olejů nebo z biologického odpadu. Výhoda Bio LPG je zejména ve snižování uhlíkové stopy v desítkách procent v porovnání s fosilním LPG a dieselu.

Uhlíková stopa paliv:

Bio LPG: 12–25 gCO₂eeqv. /MJ

Fosilní LPG: 73,6 gCO₂eeqv. /MJ

Motorová nafta: 95 gCO₂ eeqv. /MJ

Bio LPG tak přináší uhlíkovou úsporu na kilometr až 80 % oproti fosilnímu LPG a až 90 % oproti motorové naftě. Společnost PRIMAFGAS dodává BIO LPG smíchané s fosilním LPG běžně na své čerpací stanice po celém světě. V České republice se jedná o 206 čerpacích stanic, zaručila se, že se do roku 2040 bude dodávat pouze BIO paliva (zdroj: Primagas.cz).

2.5 Elektřina vs. BIO LPG

Za zmínku rovněž stojí, že elektřina se v automobilovém průmyslu již běžně používá, ale pořizovací náklady vozidla jsou vysoké. Dále se jedná o nezodpovězenou ekologickou problematiku, jakým způsobem po skončení životnosti baterie ve vozidle musí dojít k její ekologické likvidaci. Proto má LPG výhodu, že nemusí docházet k pořizování jiného palivového systému (nenavyšují se náklady na pořízení vozidla s alternativním palivem) při použití BIO LPG, ale také nedochází po skončení životnosti systému ke složité likvidaci. Z dokumentu „Vize LPG“, který zveřejnila Česká asociace LPG [41], vyplývá, že za pomoci LPG a Bio LPG lze splnit dlouhodobou strategii schválenou evropskou komisí. Tato strategie se týká dekarbonizace Evropy a tento proces bude skutečně řešit problémy ochrany životního prostředí. LPG může přispět ke splnění těchto cílů do roku 2030 a do roku 2050 zcela uspokojit poptávku po auto plynu pomocí Bio LPG. Evropský auto park má přibližně 250 milionů osobních vozidel s průměrnou životností 11 let nebo 17 let v případě východní Evropy, legislativa ale upravuje pouze emisní limity u nových vozidel, přičemž přestavba současných vozidel na LPG je nákladově efektivní, a tudíž může dojít ke zrychlení snižování emisí [41].

3 Popis systému MAGIC 2 G4 a jeho prvků

3.1 Plnicí hrdlo

Na testovaném vozidle je plnicí hrdlo ukončeno závitem s ventilem, (viz. obr. 7), proto je nutné použít redukci italského typu, (viz. obr. 8). V České republice se na všech čerpacích stanicích používá plnicí pistol italského typu. Tato redukce se musí namontovat před každým tankováním, (viz. obr. 9). U testovaného vozidla je plnicí hrdlo ukončeno závitem z důvodu malého prostoru u benzínového hrdla nádrže. Hlavním požadavkem u prezentované přestavby bylo, aby plnicí hrdlo nebylo vrtané do nárazníku. Ukončení závitem má další výhodu, že může být namontovaná redukce i jiného typu, (viz. obr. 10).



Obrázek 7: Plnicí hrdlo ukončeno závitem, (zdroj: vlastní).



Obrázek 8: Redukce italského typu. (zdroj: vlastní)



Obrázek 9: Namontovaná redukce před tankováním. (zdroj: vlastní)



Obrázek 10: Typy redukci jednotlivých typů, (zdroj: LPG servis.cz)

- | | |
|------------------|------------------------------------|
| 1. Italský typ | 5. Redukce z Belgického na Italský |
| 2. Holandský typ | 6. Redukce z Holandského na |
| 3. Belgický typ | Italský |
| 4. Ruský typ | |

3.2 Nádrž na LPG

Nádrž je konstrukčně řešena buď válcově, nebo toroidně. Válcové nádrže se umísťují do zavazadlového prostoru a bohužel snižují jeho užitný objem, toroidní nádrž se umísťuje místo rezervního kola, zde ale dochází k tomu, že rezerva musí být umístěna jinde ve vozidle, ale dle vyhlášky č. 341/2014 Sb. Již povinná rezerva být nemusí za splnění určitých podmínek. V testovaném vozidle je nainstalovaná LPG nádrž toroidní s objemem 78 l, (viz obr. 11a). Tato nádrž je opatřena multiventilem (viz. obr. 11b), který umožňuje plnění nádrže a zároveň snímá hladinu paliva a distribuuje palivo dále do motorové části vozidla. Toto má rovněž úlohu bezpečnosti provozu vozidla v případě poruchy nebo nehody. Nádrž nesmí obsahovat více paliva, než je 90 % objemu nádrže, v případě testovaného vozidla je to 70 l. Nádrž je také opatřena výrobním štítkem a její platnost je 10 let od výroby.



Obrázek 11: (a) LPG nádrž a (b) multiventil. (zdroj: vlastní)

3.3 Přepínač a ukazatel stavu paliva

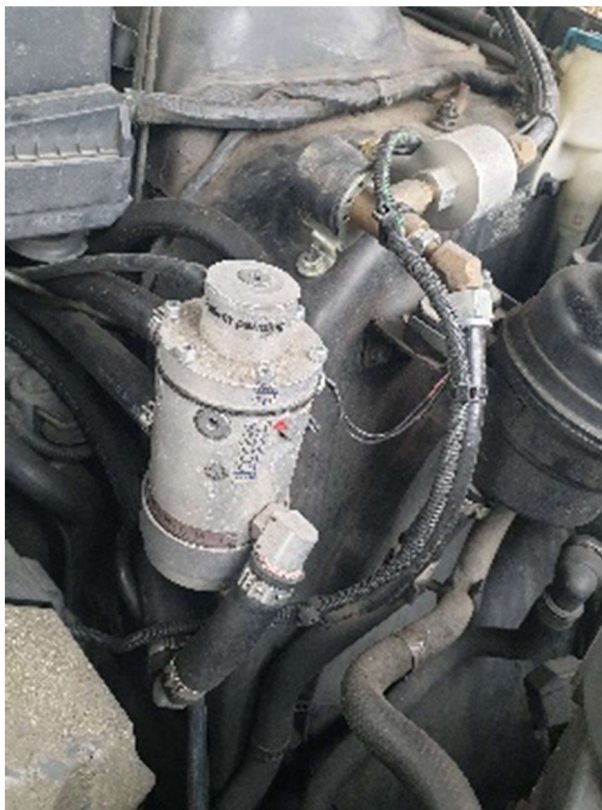
K přepínání paliv dochází automaticky po zahřátí reduktoru na minimálně 35 °C, tudíž u systému MAGIC 2 G4 je přepínač spíše určen ke sledování množství stavu paliva pomocí led-diod, (viz. obr. 12).



Obrázek 12: Ukazatel stavu paliva a přepínač. (zdroj: vlastní)

3.4 Reduktor LPG

Reduktor se využívá ke změně kapalné fáze na plynnou a snižuje tlak LPG, (Obr. 13). Reduktor je připojen na chladicí soustavu motoru, aby docházelo ke správné funkci reduktoru, musí být jeho teplota minimálně 35 °C.



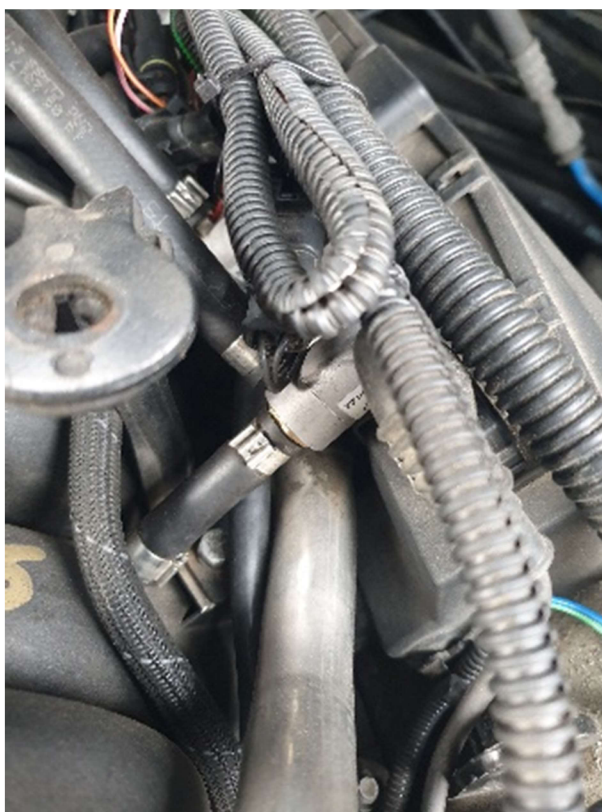
Obrázek 13: Reduktor. (zdroj: vlastní)

3.5 Vstřikovače

System MAGIC 2 G4 pracuje se vstřikovači MAGIC FX, (Obr. 14). Vstřikovače jsou připojené do saní, které bylo třeba navrtat při montáži, (viz Obr. 9), a zároveň jsou spojeny s řídicí jednotkou LPG systému.



Obrázek 14: Vstřikovač. (zdroj: vlastní)



Obrázek 15: Připojení vstřikovače. (zdroj: vlastní)

3.6 Řídící jednotka

Řídící jednotka LPG systému, viz Obrázek 16, je umístěna vedle řídicí jednotky motoru. Jednotka zajišťuje komunikaci se všemi prvky LPG systému, a současně komunikuje s jednotkou motoru. Zajišťuje přepínání jednotlivých paliv.



Obrázek 16: Řídící jednotka LPG. (zdroj: vlastní)

3.7 Vedení plynu

Vedení plynu je provedeno pomocí PVC potrubí od nádrže až po reduktor a vstřikovače, (viz obr. 17), toto potrubí je konstruováno na tlak až 20 MPa. Dříve se používal měděný materiál potrubí, který byl postupně nahrazen PVC materiálem s ohledem na zvýšenou odolnost proti vibracím a mechanickému poškození.



Obrázek 17:

https://vanmeenen.simpla.be/uploads/companies/1333/products/637800300828973700_pvc-pipe-8mm.jpg; (upraveno)

3.8 Filtry kapalné a plynné fáze

LPG musí být filtrováno stejně jako běžná paliva, ale zatímco benzínový systém má jeden druh filtru paliva, LPG má dva druhy. Filtr na kapalnou fázi, (viz obr. 18), který obsahuje papírovou vložku, se mění každých 50 000 km.



Obrázek 18: Filtr na kapalnou fázi. (zdroj: vlastní)

Filtr na plynou fázi - počet těchto filtrů je dán počtem válců motoru, na každé 4 válce je jeden filtr, testované vozidlo má 8 válců, a proto má tyto filtry dva, (viz. obr. 19). Tyto filtry také obsahují papírovou vložku a mění se každých 20 000 km.



Obrázek 19: Filtry na plynou fázi. (zdroj: vlastní)

3.9 Odborná doporučení ohledně přestavby a provozu vozidla s LPG palivem

LPG systém dokonale plní svoji funkci pouze za předpokladu, že vozidlo bezchybně funguje na původní palivo. Při nedodržení této podmínky vzniká dojem, že za vše může LPG systém, a proto je také veřejností posuzován jako vedlejší typ paliva. Jednotlivé části LPG systému od plnicího hrdla až po vstřikovače musí být homologovány pro tento účel [42]. Pro výměnu oleje v motoru dle požadavků výrobce vozidla byl stanoven interval na 20 000 km, interval výměny byl zkrácen na 10 000 km, a to nejen z důvodu provozu na LPG, ale také podle obecných informací k danému motoru, kde bylo dokázáno, že tomuto motoru neprospívá takto dlouhý interval výměny oleje, tudíž z ekonomického hlediska nedochází k dalším nákladů kvůli provozování na LPG. Obecný názor, že na vozidle s LPG palivem by se měly použít svíčky s jednobodovým zapalováním, lze vyvrátit tím, že každý výrobce LPG systému doporučuje použít zapalovací svíčky pro daný motor určený jeho výrobcem.

Základní princip dodatečné přestavby na LPG spočívá v požadavku, aby se při chodu motoru na LPG neprojevovaly žádné změny v porovnání s originálním benzínovým palivem.

4 Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zjistit pomocí provozních parametrů rozdíly při provozu vozidla na LPG (jako palivo alternativní) v porovnání s provozem na benzín (jako palivo původní). Tyto parametry budou testovány dle metodiky u vedené v této práci závěrem budou všechny parametry vyhodnoceny a také budou uvedeny vlastní poznatky autora, které byly získány za dlouhodobého provozu, nebo právě při měření jednotlivých parametrů. Také je důležitým cílem práce zhodnotit ekonomickou efektivitu přestavby vozidla na alternativní LPG.

5 Metodika měření

V této kapitole bude popsána metodika měření potřebných dat. Cílem práce je analyzovat provozní parametry při provozu vozidla na LPG vůči benzínu, a dále analyzovat průběhy výkonu motoru a krouticího momentu, spotřebu paliva a emise výfukových plynů (dynamické i statické). Všechna měření byla prováděná od 21.6.2022 do 30.9.2022.

5.1 Měření výkonu

Měření proběhlo u společnosti Profi Chip, s.r.o. - Praha. Měření výkonu proběhlo na válcové zkušebně určené pro vozidla s pohonem všech kol, pomocí tohoto měření jsme získali efektivní výkon motoru, točivý moment motoru a skutečné hodnoty, které se přenáší na kola, viz obrázek 20, měření vozidla na válcové zkušebně. Měření výkonu se provedlo na čtvrtém rychlostním stupni, výsledky z tohoto měření se nachází v části naměřené hodnoty.



Obrázek 20: Vozidlo na válcové zkušebně. (zdroj: vlastní)

5.2 Měření emisí statickou metodou

Měření statických emisí proběhlo při pravidelné kontrole dle zákona na stanici technické kontroly STK Kralupy, s.r.o., zde byly zjištěny hodnoty emisí CO , CO_2 , O_2 . Dle protokolu (viz obr. 21), ze stanice technické kontroly byl použit analyzátor AVL DiTEST GmbH, AVL Gas 1000. Naměřené hodnoty budou uvedeny ve výsledkové části práce.



LOGO FIRMY

[Název provozovatele]

[Sídlo/místo podnikání]

SME č.
____/____

TEL: ____ / ____

FAX: ____ / ____

**PROTOKOL č. ____ / ____
o měření emisí vozidla se vznětovým motorem**

Značka vozidla:	Druh vozidla:
Typ vozidla:	Kategorie vozidla:
Typ motoru:	Registrační značka:
Výrobní č. mot. *):	Rok výroby (1. registrace):
Stav počítadla ujeté vzdálenosti: km	Druh paliva:
Typ emisního systému:	

Provozovatel vozidla (jméno, adresa):

KONTROLA:

Výsledek vizuální kontroly (stav sací, výfukové a palivové soustavy):	
Výsledek kontroly závad řídicí jednotkou:	

Otáčky [min ⁻¹]	Předepsané	Naměřené
Volnoběžné		
Maximální		

Korigovaný součinitel absorpce (ze štitku) [m ⁻¹]		
Hodnota kouřivosti [m ⁻¹]	dovolená	
	naměřená	
Rozpětí hodnot kouřivosti čtyř po sobě jdoucích měření [m ⁻¹]:	dovolené	
	naměřené	

Obrázek 21: Vzor protokolu. (zdroj: vlastní)

5.3 Měření emisí dynamickou metodou reálném provozu

Měření dynamických emisí bylo provedeno na Katedře vozidel a pozemní dopravy v běžném provozu a ve vhodných meteorologických podmínkách (např. eliminace vniku vody z vozovky do koncovek výfuků). Měření bylo provedeno na předem stanové trase, která umožňuje ideálně simulovat všechny jízdní režimy vozidla (viz. obr. 22).



Obrázek 22: Mapa testovacího okruhu. (zdroj: vlastní)

Okruh měl celkovou délku 22,4 km, a měl za úkol simulovat jak jízdu po okresních silnicích, tak dopravu ve městě. Měření bylo prováděno ve třech opakováních na každé palivo, okruh se projížděl celkem šestkrát.

Měření reálných emisí bylo provedeno pomocí přenosného měřicího systému emisí (PEMS) pro sčítání a klasifikaci nanočástic Testo nanomet3 (viz. obr. 23), umožňující měřit koncentraci pevných částic o velikostech 10 až 700 nm v reálném provozu. Přístroj není třeba nějak spojovat s autem (nepoužívá protokol OBD), [39].



Obrázek 23: Nanometr v testovaném vozidle. (zdroj: vlastní)

Vzhledem k tomu, že přístroj je napájen 240 V, bylo nutné do auta dále přidat čtyři autobaterie a střídač napětí značky VICTRON, dodávající potřebných 240 V, (viz. obr. 24).



Obrázek 24: Umístění měřících přístrojů v testovaném vozidle. (zdroj: vlastní)

Přístroj PEMS se používá na testování nových vozidel v automobilovém průmyslu, od roku 2011 pro emisní normu EURO5b je toto testování povinné.

Při odběru vzorků během provozu může docházet ke kondenzaci těkavých látek do nano kapiček, které pak přístroj mohou také detekovat, proto je nutné, aby se měření provádělo při dobrých metrologických podmínkách, a proto je také upravena sonda, viz. Obrázek 25, aby nedocházelo ke kontaminaci. Vzorek také musí mít dostatečnou teplotu, tím se také eliminuje kondenzace jiných látek. Nanometr je vybaven senzory, aby nedocházelo ke kontaminaci butanolu, [39].

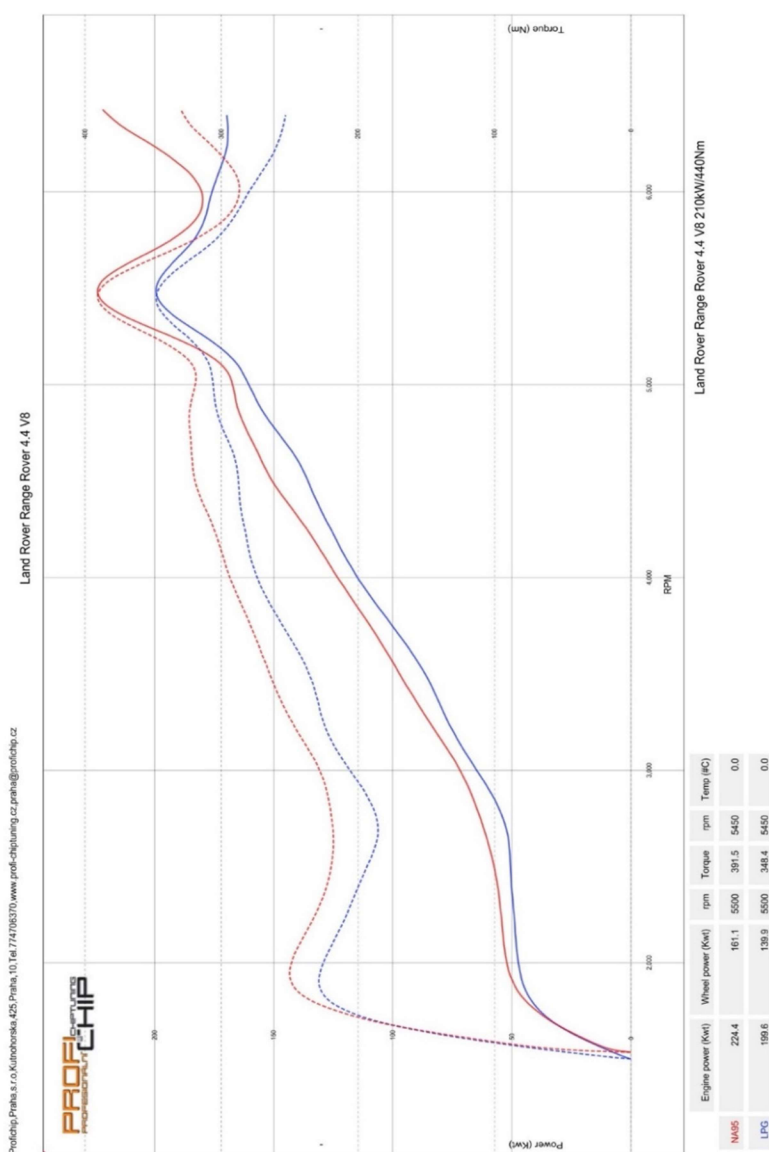


Obrázek 25: Sonda spektrometru. (zdroj: vlastní)

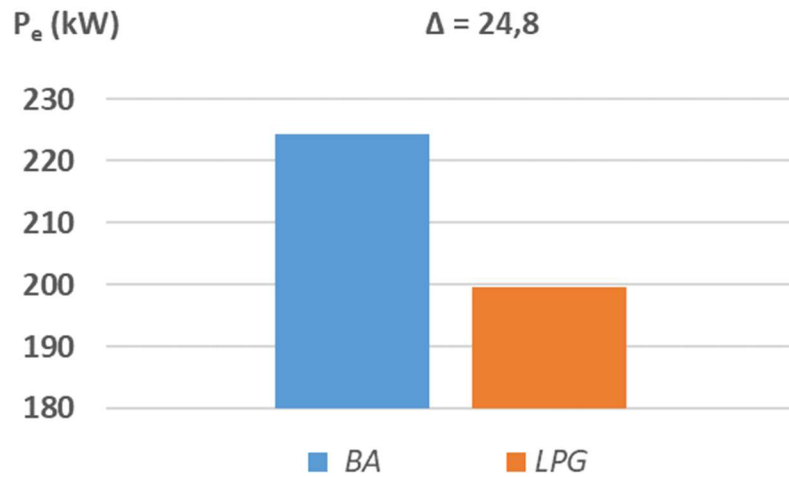
6 Naměřené hodnoty a výsledky měření

6.1 Měření efektivního výkonu a točivého momentu

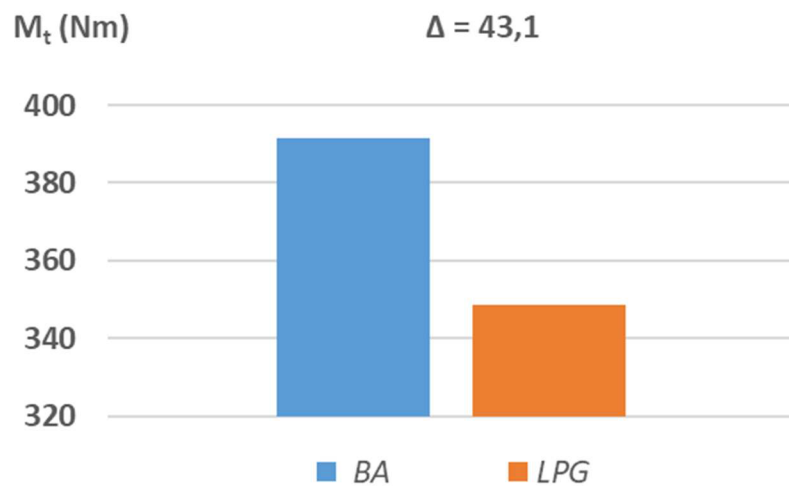
Na válcové zkušebně byl naměřen efektivní výkon a točivý moment motoru, měření bylo provedeno na čtvrtém rychlostním stupni. Graf průběhu výkonu (viz. obr. 26) poukazuje na předchozí citované závěry o rozdílu mezi benzinem a LPG. Toto může být spojováno jak s odlišnou výhřevností paliva, tepelnou účinností a teplotou vznícení LPG a benzínu [21, 30], tak i samotnou teplotou a vlhkostí nasávaného vzduchu do motoru.



Obrázek 26: Vnější otáčková charakteristika testovaného vozidla. (zdroj: vlastní)



Obrázek 27: Graf porovnání efektivního výkonu motoru pro odlišný typ paliva.



Obrázek 28: Graf porovnání točivého momentu motoru pro odlišný typ paliva.

Z výše uvedených grafů vychází jasně najevo, že dochází k poklesu výkonu při provozu na LPG. Řídící jednotku lze pro pohon LPG samozřejmě přenastavit tak, aby provoz na toto palivo měl stejné parametry jako pro benzín, nicméně, v tomto případě by evidentně docházelo k větší spotřebě LPG, což s ohledem na ekonomiku provozu postrádá určitý smysl. Ovšem v případě nezbytné potřeby zvýšit výkon motoru, může řidič vozidla systém pro LPG palivo kdykoli přetavit na benzínový režim.

6.2 Měření statických emisí

Měření statických emisí proběhlo v rámci pravidelné zákonné prohlídky na stanici STK (Obr. 29). Z protokolu je evidentní, že při volnoběžných otáčkách emise CO při provozu na LPG jsou o 0,02 % menší než při provozu na benzín a že obsah kyslíku je o 0,19 % větší než u benzínu. Emise CO_2 jsou o 1,58 % menší.

Výpis DTC: ---. Celkem 0 závad.
Vzdálenost ujetá při aktivní DTC: 0 km Stav MIL: nesvítlí

Palivo: BA

Status	n [min ⁻¹]	vyústění	CO [%]	CO ₂ [%]	HC [ppm]	Lambda [-]	O ₂ [%]	CO _{corr} [%]	NO _x [ppm]
Měřeno	610	1	0,02	15,01	8	1,031	0,69	0,02	---
Limit	550 - 750	---	max 0,50	---	---	0,970 - 1,030	---	---	---
Měřeno	2940	1	0,10	15,25	17	1,014	0,39	0,10	---
Limit	2500 - 3000	---	max 0,20	---	---	0,970 - 1,030	---	---	---

Palivo: LPG

Status	n [min ⁻¹]	vyústění	CO [%]	CO ₂ [%]	HC [ppm]	Lambda [-]	O ₂ [%]	CO _{corr} [%]	NO _x [ppm]
Měřeno	620	1	0,00	13,43	21	1,040	0,88	0,00	---
Limit	550 - 750	---	max 0,50	---	---	0,970 - 1,030	---	---	---
Měřeno	2770	1	0,00	13,79	19	1,022	0,50	0,00	---
Limit	2500 - 3000	---	max 0,20	---	---	0,970 - 1,030	---	---	---

Kontrola nádrží LPG:

Nádrž č.	Výrobce	Homologace	Životnost do:	Vizuální kontrola
1	GZWM	E20/67R/017885	01/2030	1

Obrázek 29: Protokol oficiálně naměřených hodnot emisí pro oba typy paliva podle stanice STK.

6.3 Měření dynamických emisí v reálném provozu

V této části budou uvedeny naměřené hodnoty z reálného provozu, které probíhalo na daném okruhu, viz metodika měření (kapitola 5). V tabulkách uvedených níže jsou uvedeny zjištěné hodnoty jednotlivých částic výfukových plynů jak při provozu na benzín, tak i při provozu na LPG. V jednotlivých grafech jsou dále porovnány kvantitativní rozdíly sledovaných emisních složek pro oba typy paliva.

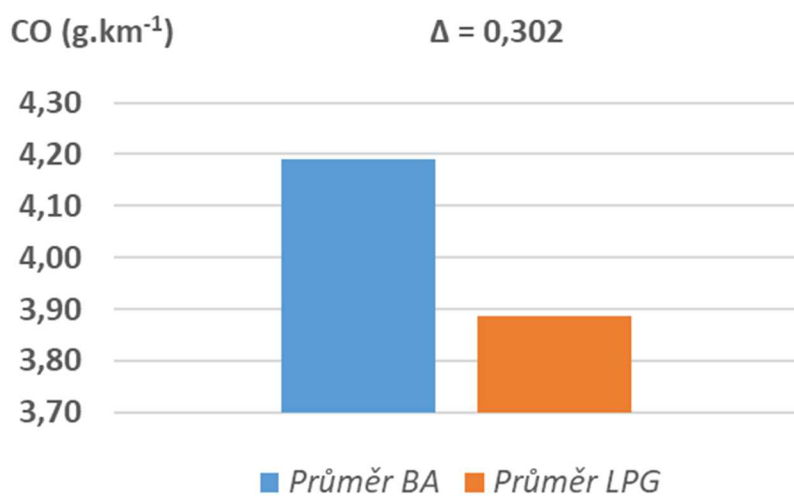
Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro benzín.

BA [g.km ⁻¹]	CO	CO ₂	N ₂ O	NO	NO ₂	NO _x	NH ₃	CH ₄
Měření 1	4,00799	388,716	0,00930	0,60116	0,00803	0,61849	0,08312	0,07599
Měření 2	4,07001	355,048	0,00525	0,42081	0,00392	0,42998	0,08303	0,06901
Měření 3	4,49193	392,059	0,00357	0,46392	0,00208	0,46956	0,04108	0,07103

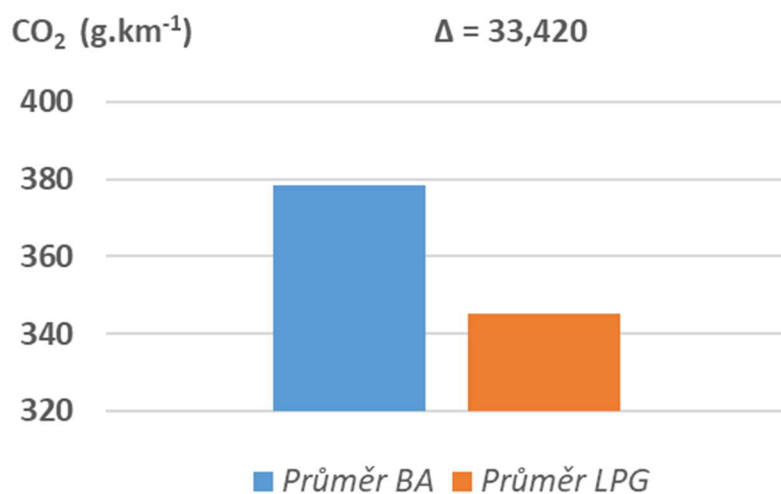
Tabulka 2: Naměřené hodnoty pro LPG.

LPG [g.km ⁻¹]	CO	CO ₂	N ₂ O	NO	NO ₂	NO _x	NH ₃	CH ₄
Měření 1	2,98506	336,33	0,00743	0,70561	0,00332	0,71635	0,09311	0,07726
Měření 2	4,70271	358,595	0,00840	0,69002	0,00375	0,70217	0,11894	0,08331
Měření 3	3,97458	340,635	0,00777	0,68421	0,00414	0,69612	0,10915	0,08015

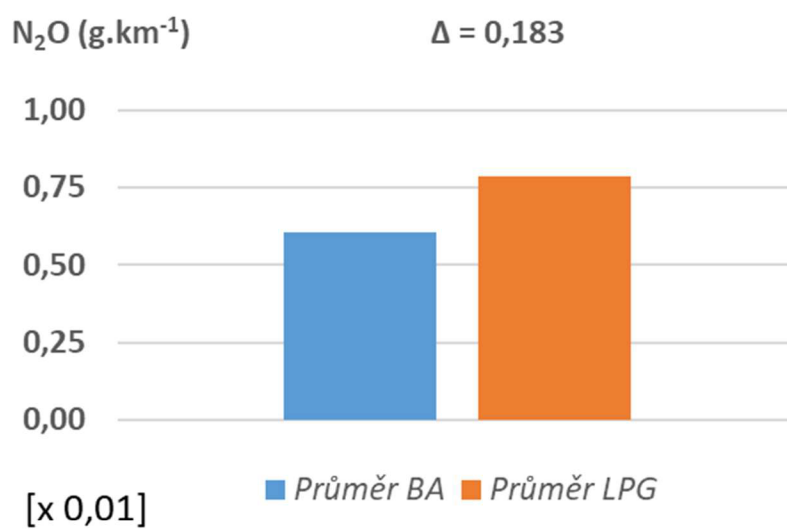
Z tabulek je patrné, že s výjimkou hodnot NO_x a Amoniaku NH_3 jsou všechny měřené hodnoty v reálných provozních podmínkách pro LPG nižší. Stanovené rozdíly jsou uvedeny v grafech na obrázcích 30 - 37.



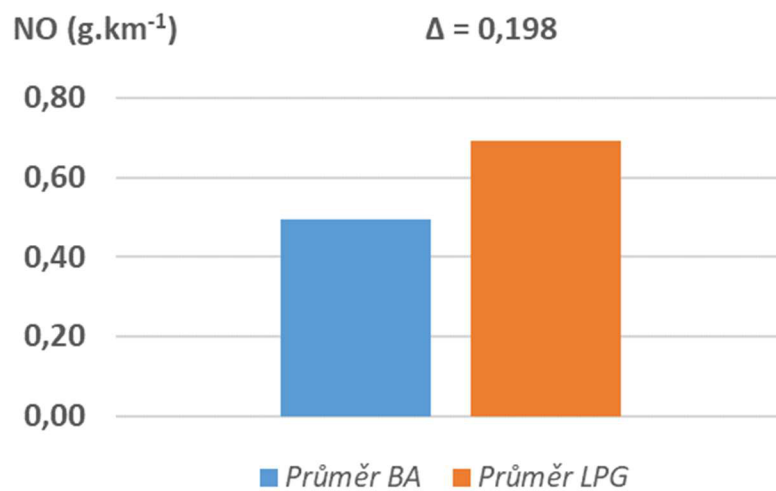
Obrázek 30: Rozdíl průměrných naměřených hodnot CO.



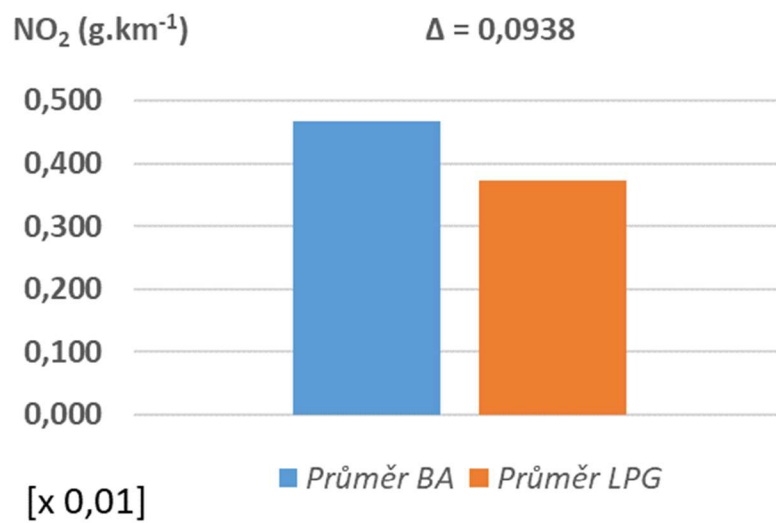
Obrázek 31: Rozdíl průměrných naměřených hodnot CO₂.



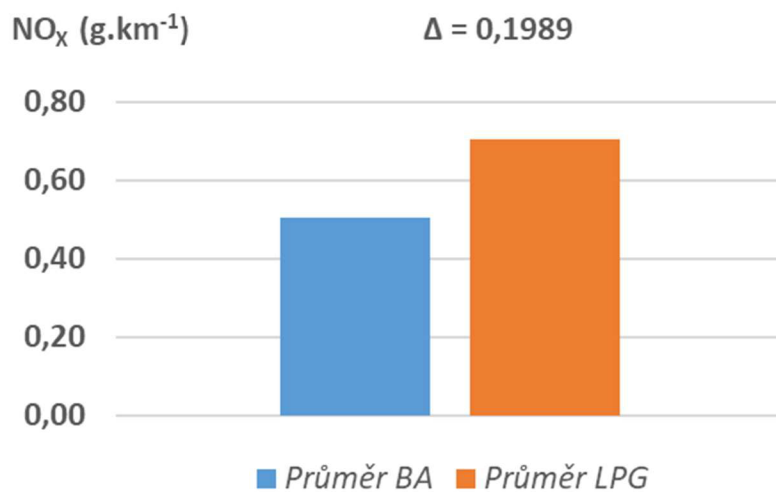
Obrázek 32: Rozdíl průměrných naměřených hodnot N₂O.



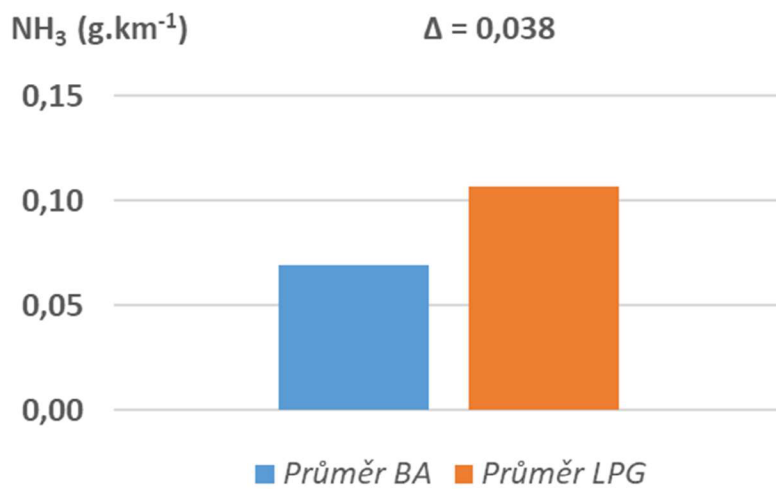
Obrázek 33: Rozdíl průměrných naměřených hodnot NO.



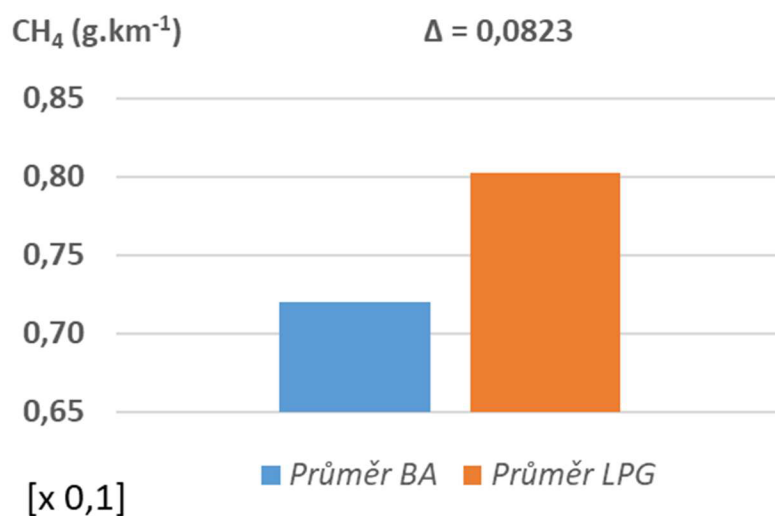
Obrázek 34: Rozdíl průměrných naměřených hodnot NO₂.



Obrázek 35: Rozdíl průměrných naměřených hodnot NO_x.



Obrázek 36: Rozdíl průměrných naměřených hodnot NH₃.



Obrázek 37: Rozdíl průměrných naměřených hodnot CH₄.

6.4 Závěr naměřených hodnot

Výsledky měření prokázaly, že při provozu vozidla na LPG bohužel dochází ke ztrátě výkonu motoru a točivého momentu i na základě předchozích závěrů [17, 18, 38], ale také bylo potvrzeno, že spalovací motor provozovaný na LPG produkuje nižší procento výfukových emisí CO , CO_2 a HC než při provozu na benzín ve shodě s [29, 30]. Evidentní navýšení všech emisních složek NO_x pro palivový režim LPG ve vzájemném porovnání s benzínem bylo samozřejmě potvrzeno, jak již bylo publikováno v minulosti [37].

7 Ekonomická část

Tato část diplomové práce se zabývá ekonomikou provozu a počáteční investicí do přestavby vozidla na alternativní palivo LPG. Přestavba byla provedena dne 25. 6. 2020. Důvod přestavby vozidla byl právě ekonomický, aby došlo ke snížení provozních nákladů testovaného vozidla. Vzhledem k široké síti čerpacích stanic LPG v České republice nad jiným palivem nebylo uvažováno.

Výhodou použití LPG v benzínových autech do roku 2022 bylo také zproštění od silniční daně (týká se pouze vozidel určených k podnikatelské činnosti), neboť vozidlo poháněné LPG je dle zákona považováno za vozidlo ekologické, a tudíž se z jeho provozování na pozemních komunikacích neodvádí silniční daň.

7.1 Počáteční investice

Přestavba vozidla proběhla ve společnosti LPG Vaněk, kde došlo k montáži LPG systému MAGIC 2 G4, cena přestavby činila 33 000,- Kč včetně DPH, poté poplatek 50,- Kč na dopravním úřadě, kde došlo k zapsání alternativního paliva do technického průkazu. Celkové náklady na přestavbu tedy činí 33 050,- Kč včetně DPH.

Spotřeba vozidla je 18 l/100 km LPG a 16 l/100 km benzínu, hlavní výhodou LPG je jeho cena, která bývá přibližně o polovinu nižší než cena benzínu, průměrná cena k 1. 1. 2023 LPG byla 16,90,- Kč a benzínu 36,90 Kč.

Náklady na 100 km

Tyto náklady byly stanoveny součinem spotřeby vozidla na 100 km a cenou paliva:

LPG:

$$18 * 16,90 = 304,2 \text{ Kč}$$

Benzín:

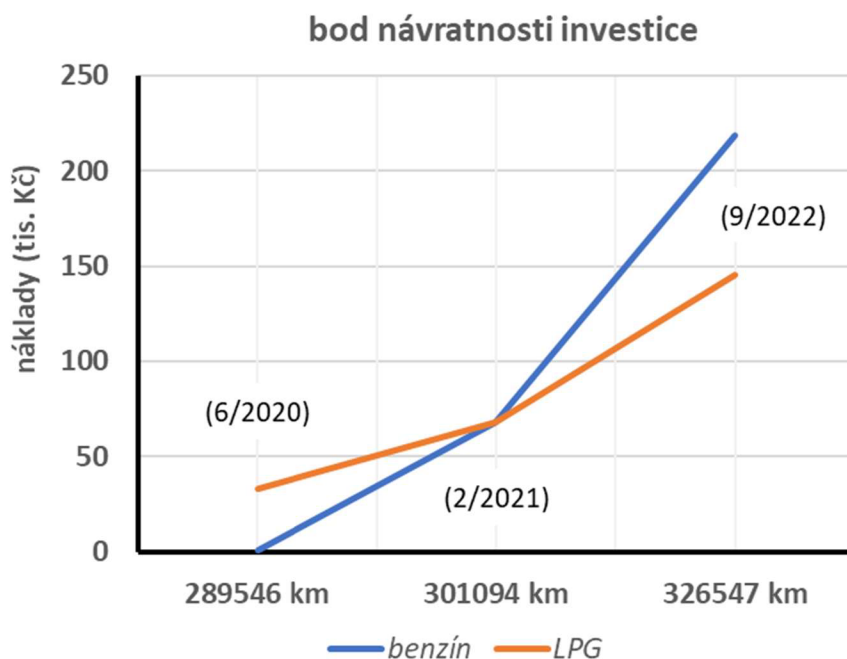
$$16 * 36,90 = 590,4 \text{ Kč}$$

$$\text{Rozdíl: } 590,4 - 304,2 = 286,2 \text{ Kč}$$

Výpočet kilometrového nájezdu pro stanovení návratnosti investice

$$33050 / (286,2 / 100) = 11548 \text{ km}$$

Dle výše uvedeného výpočtu se návratnost nákladů na přestavbu vrátí po ujetí 11548 km, (viz. obr. 38). Při ročním nájezdu vozidla přibližně 15 000 km, došlo k navracení investice už během prvního roku používání.



Obrázek 38: *Návratnost investice pro testované vozidlo.*

Do vozu bylo alternativní palivo nainstalováno s nájezdem 289546 km, v době testování mělo vozidlo nájezd 316547 km. Za dva roky provozování tedy vozidlo ujelo 37001 km.

7.2 Výpočet celkové úspory nákladů na pohonné hmoty od přestavby vozidla

Náklady na spotřebu paliva od přestavby vozidla do současnosti:

Benzín:

(počet najetých km/100) * spotřeba paliva /100 km * průměrná cena paliva

$$(37001/100) * 16 * 36,90 = 218 454,- \text{ Kč}$$

LPG:

(počet najetých km/100) * spotřeba paliva/100 km * průměrná cena paliva

$$(37001/100) * 18 * 16,90 = 112 557 \text{ Kč}$$

Rozdíl:

Náklady na benzín - náklady na LPG:

$$218453,904 - 112557,042 = 105 897 \text{ Kč}$$

Náklady po odečtení investice

Rozdíl nákladů - počáteční investice:

$$105 896,862 - 33050 = 72 847 \text{ Kč}$$

Výpočtem bylo zjištěno, že za dva roky provozování vozidla bylo ušetřeno 72 847,- Kč, nutno ještě odečíst náklady na povinné roční revize $2 * 300,- \text{ Kč}$ a výměnu filtrů plynné části, která se uskutečňuje každých 20000 km. Cena výměny filtrů je 500,- Kč.

Celkové uspořené náklady

Náklady po odečtení investice-povinné revize - výměna filtrů:

$$72947 - (2*300) - 500 = \underline{71 747,- \text{ Kč}}$$

7.3 Závěr ekonomické části

Dle uvedených výpočtů bylo dokázáno, že každých ujetých 100 km dochází k úspoře 286,2 Kč, tudíž došlo za dva roky provozu vozidla a po odečtení prvotní investice k celkové úspoře 71 747,- Kč. Uváděné ceny jsou vždy včetně DPH. Nutno také zmínit, že pokud by došlo k poškození motoru (pouze zvýšená rychlost opotřebení), tak při současných cenách lze provést kompletní generální opravu daného motoru za 300 000,- Kč. Pokud vezmeme v úvahu návratnost investice, náklady na tuto opravu by se opětovně vrátily za pouhých 4,5 roku provozu vozidla na LPG. Vzhledem ke zkušenostem provozovatelů daného motoru na LPG palivo, tato situace však nenastává, ale spíše dojde k celkovému opotřebení a stárnutí motoru, nicméně, tento průběh stárnutí motorů je normální i při provozování pouze na původní palivo, kterým je v tomto případě benzín.

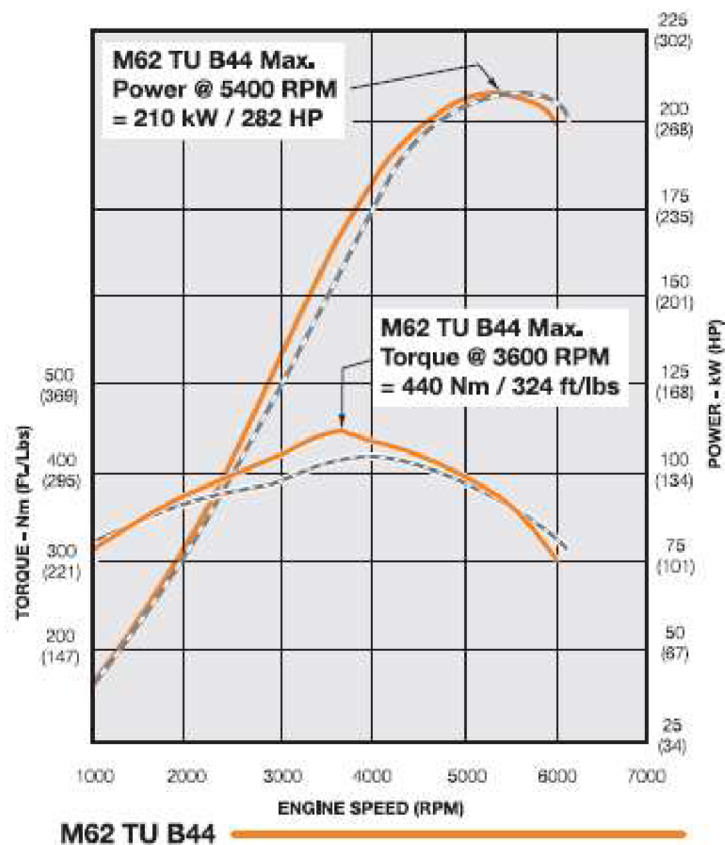
8 Diskuse a možná doporučení autora

Porovnáním naměřené vnější otáčkové charakteristiky a publikovanou charakteristikou nového motoru výrobcem (viz. obr. 39), je evidentní zřetelný pokles u obou parametrů efektivního výkonu i točivého momentu motoru, který může být způsoben ucpanými katalyzátory olejem, což je u těchto motorů a při tomto zaznamenaném nájezdu kilometrů zcela běžná závada. Dalším faktorem, který může být uveden jako stěžejní, je vadný systém VANOS (zkratka německého Variable Nockenwellen Steuerung). Jedná se o zařízení, které používá elektronická řídicí jednotka motoru pro variabilní časování ventilů, a právě nefunkčnost tohoto zařízení způsobuje již zmíněný pokles výkonu motoru.

Tyto provozní problémy autor a majitel testovaného vozidla reflektuje, nicméně doporučuje využít palivový systém LPG ať už od výrobce vozidla, nebo jako v tomto případě dodatečnou přestavbou. Z ekonomického hlediska dochází k výrazné úspoře nákladů na pohonné hmoty a zároveň má LPG ekologický potenciál s ohledem na produkci nižších hodnot emisí CO , CO_2 a HC a tím dochází k menšímu znečištění životního prostředí.

Doporučení autora tedy je, že pokud provozovatel vozidla neřeší pohled jak ekologický, tak ekonomický, ale sleduje naopak výkon vozidla, nedoporučuje provoz na LPG.

Pokud provozovatel sleduje ekonomický a ekologický pohled, tak přestavbu velmi doporučuje i z hlediska další výhodnosti kdy systém LPG lze libovolně vypnout i v průběhu jízdy.



Obrázek 39: Vnější otáčková charakteristika nového motoru m62TUB44;
www.bimmerboard.com/members/ripp222/original/Tab4 M62 TU Engine.pdf
 (zdroj [40]; upraveno)

9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat základní provozní parametry terénního vozidla poháněného alternativním palivem LPG a vzájemné porovnání veličin jako jsou spotřeba paliva, emise a výkon motoru. Literární rešerše obsahuje úvod do řešené problematiky alternativních paliv. V úvodní části jsou popsány ekologické aspekty využití alternativního paliva.

Na základě literární rešerše jsou zde popsány přístupy, které umožňují porovnat různé přístupy náhrady fosilních paliv. Hlavní část literární rešerše klade důraz na posouzení použitelnosti LPG jako adekvátní náhrady paliva pro zážehové motory, jako ekologického typu paliva i s ohledem na predikovaný ekonomický vývoj společnosti.

Na základě analýzy dostupné literatury byla popsána problematika alternativního paliva LPG s ohledem na jeho problematiku ve vztahu ke snížení výkonu motoru a specifikaci úpravy motoru, složení systémů plnění motoru, možná doporučení při míchání poměru benzín/LPG za účelem porovnání spalovacích charakteristik u zážehových motorů.

Další část diplomové práce popisuje palivovou konstrukci a složení systému MAGIC 2 G4, určený pro použití LPG paliva v zážehovém motoru. Tento systém byl instalován v roce 2020 do testovaného vozidla.

Praktická část práce spočívala v testování dvou typů paliva v terénním vozidle Range Rover L322 r.v. 2004, zdvihový objem motoru 4383 cm³, výkonu motoru 210 kW a točivém momentu motoru 440 Nm.

Měření probíhala ve dvou částech, kdy první bylo provedeno na válcové zkušebně za účelem změření vnější otáčkové charakteristiky pro oba typy paliv. Analýza výsledků prokázala významné snížení výkonu motoru o 20% a točivého momentu motoru o 10%, což koresponduje s publikovanými závěry uvedenými v literární rešerši. Ve druhé části probíhalo testování v reálných podmínkách silničního provozu na předem stanovené trase o délce 24,4 km. Měření zahrnovalo analýzu výfukových plynů vozidla pro ujetou vzdálenost 74 km na každý typ paliva.

Ekonomická část popisuje výhodnost použití alternativního paliva LPG v porovnání s původním typem paliva. Rovněž byla stanovena návratnost investice do přestavby palivového systému. Vzhledem k současným cenám obou paliv je možné konstatovat, že

dochází k úspoře až 50 % nákladů na konvenční palivo v období 3 let od doby instalace palivového systému do vozidla. Po odečtení investice došlo k významné úspoře nákladů v celkové výši 72 tis. Kč, což odpovídá 286,2 Kč na 100 km ujeté vzdálenosti ve smíšeném provozu.

Na základě dosažených výsledků je možné konstatovat, že použití alternativního paliva LPG má v dnešní době pozitivní vliv na ekonomiku provozování i starších vozidel o velkém objemu motoru a nesporně evidentní pozitivní ekologický dopad při provozování těchto vozidel.

10 Seznam použité literatury

- [1] Meisam Ahmadi Ghadikolaei, Pak Kin Wong, Chun Shun Cheung, Jing Zhao, Zhi Ning, Ka-Fu Yung, Hang Cheong Wong, Nirmal Kumar Gali, Why is the world not yet ready to use alternative fuel vehicles?, *Heliyon*, Volume 7, Issue 7, 2021, e07527, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07527>.
- [2] V.H. Pradeep, V.T. Amshala, B.R. Kadali, Does perceived technology and knowledge of maintenance influence purchase intention of BEVs, *Transport. Res. Transport Environ.* 93 (2021) 102759.
- [3] International Energy Agency (IEA), *Energy Technology Perspectives 2020*, Available from: [https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspective](https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspective-s-2020) s-2020. (Accessed 15 December 2020)
- [4] Energy Information Administration (EIA), *Annual Energy Outlook 2020 with Projections to 2050*, 2020. Available from: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2020%20Full%20Report.pdf>. (Accessed 15 December 2020).
- [5] Energy Information Administration (EIA), *Annual Energy Outlook 2018 with Projections to 2050*, 2018. Available from: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf>. (Accessed 17 December 2020)
- [6] J. Kadhem, K. Reza, W. Ahmed, Alternative fuel use in Iraq: a way to reduce air pollution, *Eur. J. Eng. Technol. Res.* 2 (5) (2017) 20–30.
- [7] S. Simsek, S. Uslu, The effect of using amyl alcohol in a diesel engine on performance and emission parameters, *Int. J. Autom. Sci. Technol.* 5 (1) (2021), 19–26.
- [8] S. Simsek, S. Uslu, H. Simsek, Evaluation of the effect of a new alternative fuel containing boron and hydrogen on gasoline engine performance and emission responses, *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19 (6) (2022) 4913–4922
- [9] S. Simsek. Increasing cetane number of the diesel fuel by fuel additives, *Int. J. Autom. Sci. Technol.* 4 (4) (2020) 300–306
- [10] F. Synák, K. Čulík, V. Rievaj, J. Gaňa, Liquefied petroleum gas as an alternative fuel, *Transp. Res. Procedia* 40 (2019) 527–534.

- [11] H.B. Bisen, Y. Suple, Experimental Investigations of exhaust emissions of four stroke SI Engine by using direct injection of LPG and its analysis, *Int. J. Mod. Eng. Res.* 3 (5) (2013) 2600–2605. .pp
- [12] Autogas in Europe, the sustainable alternative. An LPG industry roadmap. The European liquefied petroleum gas association (AEGPL). Brussels, Belgium; 2013, 40 p.
- [13] Johnson E. LPG: a secure, cleaner transport fuel? A policy recommendation for Europe *Energ Policy* 2003; 31:1573–7
- [14] Güla T, Kypreos S, Turtona H, Barreto L. An energy-economic scenario analysis of alternative fuels for personal transport using the Global Multi-regional MARKAL model (GMM). *Energy* 2009;34:1423–37.
- [15] Liquid Gas Europe, 2022. Autogas Incentive Policies report. World LPG Association (WLPGA) and Liquid Gas Europe, Brussels, 149 pp.
- [16] Bayraktar H, Durgun O. Investigating the effects of LPG on spark ignition engine combustion and performance. *Energy Convers Manage* 2005;46: 2317–2333
- [17] Li L., Wang Z., Deng B., Han Y., Wang H. Combustion and emissions characteristics of a small spark-ignited LPG engine. *SAE Technical Paper*; 2002-01-17382002.
- [18] Masi M. Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fueled with LPG (liquefied petroleum gas). *Energy* 2012;41:252–60.
- [19] Li L., Wang Z., Deng B., Han Y., Wang H. Combustion and emissions characteristics of a small spark-ignited LPG engine. *SAE Technical Paper*; 2002-01-17382002.
- [20] M. Lim, A. Godwin, L. Morawska, Z.D. Ristovski, R.E. Jayaratne, S. Kokot, A comparative study of the elemental composition of the exhaust emissions of cars powered by liquefied petroleum gas and unleaded petrol, *Atmos. Environ.* 40 (17), (2006) 3111–3122.
- [21] B. Erkus A. Surmen, M. Karamangil, R. Arslan, C. Kaplan, The effect of ignition timing on performance of LPG injected SI engine, *Energy, Educ., Sci. Technol.* 28 (2) (2012) 1199–1206.
- [22] G. Choi, J. Kim, C. Homeyer, Effects of different LPG fuel systems on performances of variable compression ratio single cylinder engine, in: *Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference* 46628, 2002, pp. 369–375.

- [23] K. Mustafa, H. Gitano-Briggs, Liquefied petroleum gas (LPG) as an alternative fuel in spark ignition engine: performance and emission characteristics, in: IEEE, 3rd International Conference on Energy and Environment, 2009, pp. 189–194.
- [24] M. Gumus, Effects of volumetric efficiency on the performance and emissions characteristics of a dual fueled (gasoline and LPG) spark ignition engine, Fuel Energy Abstracts 92 (10) (2011) 1862–1867.
- [25] E. Pipitone and S. Beccari, "Performances and emissions improvement of an SI engine fuelled by LPG/gasoline mixtures," SAE Technical Paper 0148-7191, 2010.
- [26] S.M. Abdulhaleem, H.A. Mohammed, Experimental investigation of a four stroke spark ignition engine operated with naphtha or gasoline blended LPG, Appl. Mech. Mater. 841 (2016) 272–277.
- [27] N. Mustafa, M. Fawzi, S.A. Osman, M.M. Tukiman, Experimental analysis of liquid LPG injection on the combustion, performance and emissions in a spark ignition engine, in: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 469, IOP Publishing, 2019, 012033.
- [28] N. Mustafa, M. Fawzi, A. Khalid, S. Osman, N. Jaat, M. Tukiman", Effects of liquid LPG injection on combustion stability in spark ignition engine, J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci. 76 (1) (2020) 164–171.
- [29] M. Usman, N. Hayat, Lubrication, emissions, and performance analyses of LPG and petrol in a motorbike engine: a comparative study, J. Chinese Inst. Eng. 43 (1) (2020) 47–57.
- [30] S. Simsek, S. Uslu, Investigation of the impacts of gasoline, biogas and LPG fuels on engine performance and exhaust emissions in different throttle positions on SI engine, Fuel 279 (118528) (2020).
- [31] T. Adegboye, I. Oluwaleye, O. Akinola, R. Ajayi, Analysis of the exhaust emissions from single cylinder non-mobile spark ignition generator fuelled with petrol and LPG alternatively, Int. J. Innov. Sci. Res. Technol. 6 (2) (2021) 446–449.
- [32] E. Arabacı, Simulation and performance analysis of a spark ignition engine using gasoline and LPG as fuel, J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ. 36 (1) (2021) 447–457.

- [33] S. Simsek, S. Uslu, H. Simsek, G. Uslu, Improving the combustion process by determining the optimum percentage of liquefied petroleum gas (LPG) via response surface methodology (RSM) in a spark ignition (SI) engine running on gasoline-LPG blends, *Fuel Process. Technol.* 221 (2021), 106947.
- [34] Uherek E, Halenka T, Borken-Kleefeld J, Balkanski Y, Berntsen T, Borrego C, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: land transport. *Atmos Environ* 2010;44:4772–816.
- [35] MacLean HL, Lave LB. Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies. *Prog Energy Combust* 2003;29:1–69.
- [36] Yossefi D, Belmont MR, Ashcroft SJ, Maskell SJ. A comparison of the relative effects of fuel composition and ignition energy on the early stages of combustion in a natural gas spark ignition engine using simulation. *Proc Inst Mech Eng Pt D J Automob Eng.* 2000;2014:383–94.
- [37] Badr O, Alsayed N, Manaf M. A parametric study on the lean misfiring and knocking limits of gas-fueled spark ignition engines. *Appl Therm Eng* 1998;18:579–94.
- [38] Sulaiman MY, Ayob MR, Meran I. Performance of single cylinder spark ignition engine fueled by LPG. *Proc Eng* 2013;53:579–85.
- [39] Testo, <https://www.testo.com/cz-CZ/pristroje/pems>, (zdroj 2/2023).
- [40] BMW, www.bimmerboard.com/members/ripp222/original/Tab4 M62 TU Engine.pdf
- [41] Česká asociace LPG, <https://calpg.cz>
- [42] Štěřba P. *Automobily s pohonem na LPG*. CPress 2013, pp168. ISBN 978-80-264-0148-3.

11 Seznam obrázků

Obrázek 1: <i>Globální predikce počtu vozidel podle typu paliva pro osobní a lehká užitková vozidla. (zdroj: Energy Information Administration (EIA), Annual Energy Outlook 2018 with Projections to 2050, 2018.....</i>	11
Obrázek 2: <i>Světová spotřeba LPG v období 2000 – 2021, (zdroj: Liquid Gas Europe, 2022. Autogas Incentive Policies report. World LPG Association (WLPGA) and Liquid Gas Europe, Brussels, 149 pp, (upraveno [15]).</i>	13
Obrázek 3: <i>Celková spotřeba LPG a celkový počet nových vozidel v České republice v období 2000 – 2021, (zdroj: Liquid Gas Europe, 2022. Autogas Incentive Policies report. World LPG Association (WLPGA) and Liquid Gas Europe, Brussels, 149 pp, (upraveno [15]).</i>	13
Obrázek 4: <i>Porovnání rentability při použití LPG oproti ostatním typům paliva v České republice v období 2000 – 2021, (zdroj: Liquid Gas Europe, 2022. Autogas Incentive Policies report. World LPG Association (WLPGA) and Liquid Gas Europe, Brussels, 149 pp (upraveno [15]).</i>	14
Obrázek 5: <i>Porovnání průběhů točivého momentu a efektivního výkonu pro benzín a LPG při odlišných teplotách paliva. (zdroj: Masi M. Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fueled with LPG (liquefied petroleum gas). Energy 2012;41:252–60.; upraveno [18]).</i>	19
Obrázek 6: <i>Porovnání průběhů měrné a hodinové spotřeby paliva při různých režimech zatížení motoru pro benzín a LPG. (zdroj: Masi M. Experimental analysis on a spark ignition petrol engine fueled with LPG (liquefied petroleum gas). Energy 2012;41:252–60.; upraveno [18]).</i>	19
Obrázek 7: <i>Plnicí hrdlo ukončeno závitem, zdroj: vlastní</i>	22
Obrázek 8: <i>Redukce italského typu, zdroj: vlastní</i>	23
Obrázek 9: <i>Namontovaná redukce před tankováním, zdroj: vlastní</i>	23
Obrázek 10: <i>Typy redukcí jednotlivých typů, zdroj: LPG servis.cz</i>	24
Obrázek 11: <i>(a) LPG nádrž a (b) multiventil, zdroj: vlastní</i>	25
Obrázek 12: <i>Ukazatel stavu paliva a přepínač, zdroj: vlastní</i>	25
Obrázek 13: <i>Reduktor, zdroj: vlastní</i>	26
Obrázek 14: <i>Vstřikovač, zdroj: vlastní</i>	27
Obrázek 15: <i>Připojení vstřikovače, zdroj: vlastní</i>	27
Obrázek 16: <i>Řídící jednotka LPG, zdroj: vlastní</i>	28

Obrázek 17:	
https://vanmeenen.simpla.be/uploads/companies/1333/products/637800300828973700_pv-c-pipe-8mm.jpg	29
Obrázek 18: <i>Filtr na kapalnou fázi, zdroj: vlastní</i>	29
Obrázek 19: <i>Filtry na plynou fázi, zdroj: vlastní</i>	30
Obrázek 20: <i>Vozidlo na válcové zkušebně, zdroj: vlastní</i>	33
Obrázek 21: <i>Vzor protokolu, zdroj: vlastní</i>	34
Obrázek 22: <i>Mapa testovacího okruhu, zdroj: vlastní</i>	35
Obrázek 23: <i>Nanometr v testovaném vozidle, zdroj: vlastní</i>	36
Obrázek 24: <i>Umístění měřicích přístrojů v testovaném vozidle, zdroj: vlastní</i>	36
Obrázek 25: <i>Sonda spektrometru, zdroj: vlastní</i>	37
Obrázek 26: <i>Vnější otáčková charakteristika testovaného vozidla, zdroj: vlastní</i>	38
Obrázek 27: <i>Graf porovnání efektivního výkonu motoru pro odlišný typ paliva</i>	39
Obrázek 28: <i>Graf porovnání točivého momentu motoru pro odlišný typ paliva</i>	39
Obrázek 29: <i>Protokol oficiálně naměřených hodnot emisí pro oba typy paliva podle stanice STK</i>	40
Obrázek 30: <i>Rozdíl průměrných naměřených hodnot CO</i>	41
Obrázek 31: <i>Rozdíl průměrných naměřených hodnot CO</i>	42
Obrázek 32: <i>Rozdíl průměrných naměřených hodnot N2O</i>	42
Obrázek 33: <i>Rozdíl průměrných naměřených hodnot NO</i>	43
Obrázek 34: <i>Rozdíl průměrných naměřených hodnot NO2</i>	43
Obrázek 35: <i>Rozdíl průměrných naměřených hodnot NOx</i>	44
Obrázek 36: <i>Rozdíl průměrných naměřených hodnot NH3</i>	44
Obrázek 37: <i>Rozdíl průměrných naměřených hodnot CH4</i>	45
Obrázek 38: <i>Návratnost investice pro testované vozidlo</i>	47
Obrázek 39: <i>Vnější otáčková charakteristika nového motoru m62TUB44; zdroj [40]: www.bimmerboard.com/members/ripp222/original/Tab4 M62 TU Engine.pdf (upraveno)</i>	51

12 Seznam tabulek

Tabulka 1: Naměřené hodnoty pro benzín.....	41
Tabulka 2: Naměřené hodnoty pro LPG.....	41