

# VLASTNOSTI VOZIDLOVÉHO ZÁŽEHOVÉHO MOTORU PŘI PROVOZU NA ALTERNATIVNÍ PALIVA CNG A LPG

*Prof. Ing. Stanislav Beroun, CSc., Ing. Josef Blažek,  
Ing. Radek Holubec, Ing. Jan Mareš, Ing. Marcel Vencel  
Technická univerzita v Liberci*

**Česká republika**

## **Souhrn**

*Článek obsahuje shrnutí výsledků výzkumných prací na moderním vozidlovém zážehovém (benzinovém) motoru při jeho konverzi na různopalivový motor s možností provozu buď na benzin nebo alternativní palivo (CNG nebo LPG). Provoz motoru na alternativní paliva byl realizován podobně jako provoz motoru na benzin s tvořením směsi vícebodovým přívodem paliva do sacího traktu motoru a elektronickou regulací bohatosti směsi a předstihu zážehu. Výzkumný program byl zaměřen jak na výkonové a emisní parametry motoru, tak na parametry pracovního oběhu motoru při provozu na benzin a na alternativní paliva. Měření byla prováděna na zkušebním stanovišti s automatizovaným sběrem dat všech měřených veličin. Použitá měřicí a výpočetní technika pro vysokotlakou indikaci umožňovala detailní studium průběhu vyhořívání náplně válce i vyhodnocení průběhu tlaku ve válci z hlediska mezicyklové variability. V případě LPG byla použita i vizualizační technika pro studium dějů v sacím traktu motoru při tvoření směsi vstříkáváním kapalného LPG.*

## **Úvod**

Osobní automobily se zážehovými motory lze celkem jednoduše provozovat na alternativní plynná paliva NG nebo LPG. U moderních zážehových motorů je jejich úprava pro provoz na alternativní palivo řešena zástavbou vefukovačů (injektorů) plynného paliva do sacího traktu motoru (vnější tvoření směsi). Vícebodové vefukování plynného paliva je řízeno elektronickou jednotkou, napojenou na původní ERJ pro benzinový provoz. Přejod z automobilového benzínu na alternativní plynné palivo se u takto provedené úpravy motoru projeví u nepřepřítovaných motorů snížením výkonových parametrů motoru. Snížení výkonu je dáno větším objemem plynného paliva ve směsi (i proti zcela odpařenému benzínu) a do válce motoru je proto nasáté menší množství vzduchu. Poměrnou změnu hodnoty  $p_e$  v režimu 100% zatížení po konverzi benzinového motoru ( $\lambda=1$ ) na plynné alternativní palivo ukazuje zjednodušený vztah, odvozený za předpokladu stejných hodnot plicích účinností i celkových účinností obou motorů:

$$\frac{P_{e/plyn}}{P_{e/benz}} = \frac{(A_{T/benz} \cdot r_{air} + r_{benz}) \cdot H_{L/plyn} \cdot T_{DÚ/benz}}{(A_{T/plyn} \cdot r_{air} + r_{plyn}) \cdot H_{L/benz} \cdot T_{DÚ/plyn}}$$

Teoretická spotřeba vzduchu je pro benzin  $A_{T/benz} = 14,5 \text{ kg/kg}$  a pro plynná paliva je  $A_{T/LPG} = 15,6 \text{ kg/kg}$  a  $A_{T/NG} = 16,9 \text{ kg/kg}$ .

Plynová konstanta  $r$  je pro vzduch  $r_{air} = 287 \text{ J/kgK}$ , pro LPG je  $r_{LPG} = 168 \text{ J/kg K}$  a pro NG je  $r_{NG} = 516 \text{ J/kgK}$ . Přehřáté páry benzínu mají plynovou konstantu  $r_{benz} = 76 \text{ J/kgK}$ . Dolní výhřevnost paliva  $H_L$  paliv je pro benzin:  $H_{L/benz} = 43 \text{ MJ/kg}$ , pro LPG je  $H_{L/LPG} = 46,1 \text{ MJ/kg}$  a pro zemní plyn je  $H_{L/NG} = 49 \text{ MJ/kg}$ .

Teplota náplně válce na konci plnění  $T_{DÚ}$ : teplota v benzinovém motoru  $T_{DÚ/benz}$  bude proti teplotě v plynových motorech  $T_{DÚ/LPG}$  o  $(10-15)^\circ\text{C}$  nižší v důsledku odpařování benzínu v nasávaném vzduchu (odhad:  $T_{DÚ/benz} \approx 335 \text{ K}$ ,  $T_{DÚ/LPG}$  i  $T_{DÚ/NG} \approx 350 \text{ K}$ ).

Výpočet s využitím uvedených hodnot dává poměrné snížení výkonu při náhradě benzínu plyným palivem, přiváděným do nasávaného vzduchu.

Při provozu motoru na NG je pokles výkonových parametrů motoru proti provozu na benzin relativně výrazný:  $\frac{P_{e/NG}}{P_{e/benz}} = 0,85 \div 0,82$ . Při provozu na LPG se výkon motoru

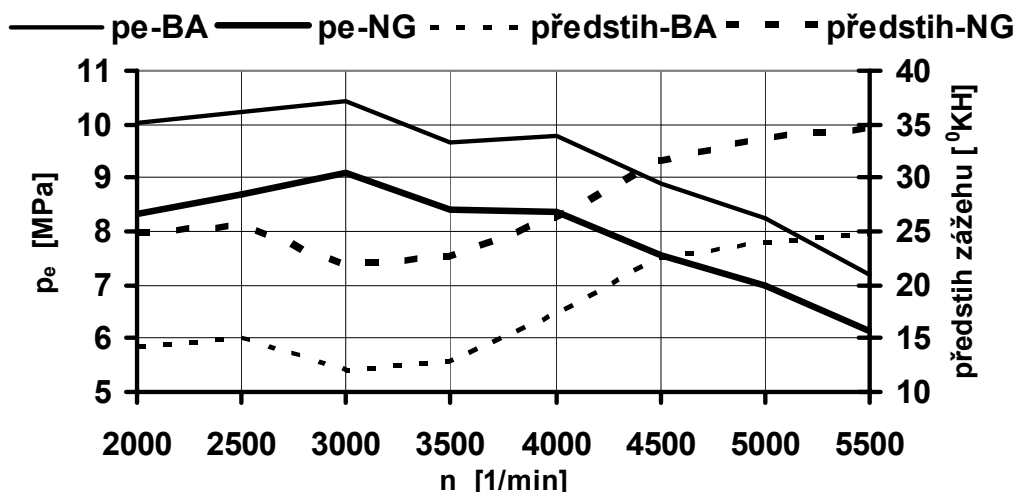
proti provozu na benzin sníží v poměru  $\frac{P_{e/LPG}}{P_{e/benz}} = 0,93 \div 0,90$ .

V případě LPG lze úpravu benzinového motoru pro provoz na LPG provést ale i tak, že do sacího traktu motoru se vstřikuje kapalná fáze LPG. Účinkem intenzivního odpařování vstřikovaného LPG dojde k výraznějšímu snížení teploty nasávané směsi do motoru (tím zvýší se dopravní účinnost motoru) a změna výkonových parametrů je potom proti benzinovému provozu zanedbatelná. Palivové systémy pro LPG se vstřikováním kapalného paliva jsou však proti systémům s tvořením směsi plynou fází LPG využívány v podstatně menších počtech.

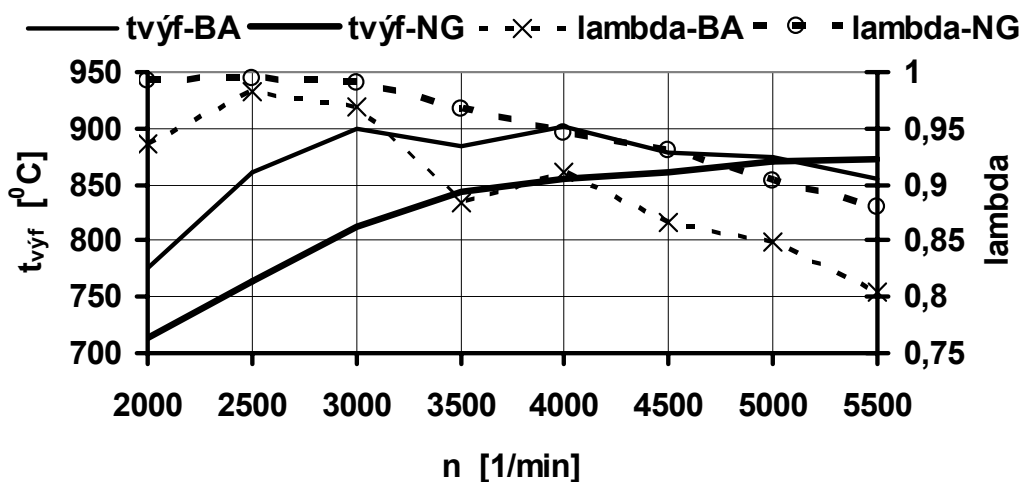
Vedle změny výkonových parametrů motoru se provoz motoru na alternativní paliva odlišuje proti původnímu benzinovému motoru i v dalších (více nebo méně významných) vlastnostech. Odchytky jsou způsobeny rozdílnými vlastnostmi jednotlivých paliv a ovlivňuje je i seřízení motoru. Původní elektronická řídicí jednotka optimalizuje seřízení motoru pro benzinový provoz, zatímco připojená řídicí jednotka pro alternativní palivový systém provádí regulaci bohatosti směsi a předstihu zážehu pouze nastavením korekcí v připojené řídicí jednotce plynového systému, kterými se v určitém rozsahu upravuje seřízení podle dat z programu řídicí jednotky pro benzinový provoz. Následující odstavce, grafy a obrázky vysvětlují podrobněji změny některých vlastností původního benzinového motoru při jeho provozu na alternativní paliva.

## Výkonové a provozní parametry motoru při provozu na NG

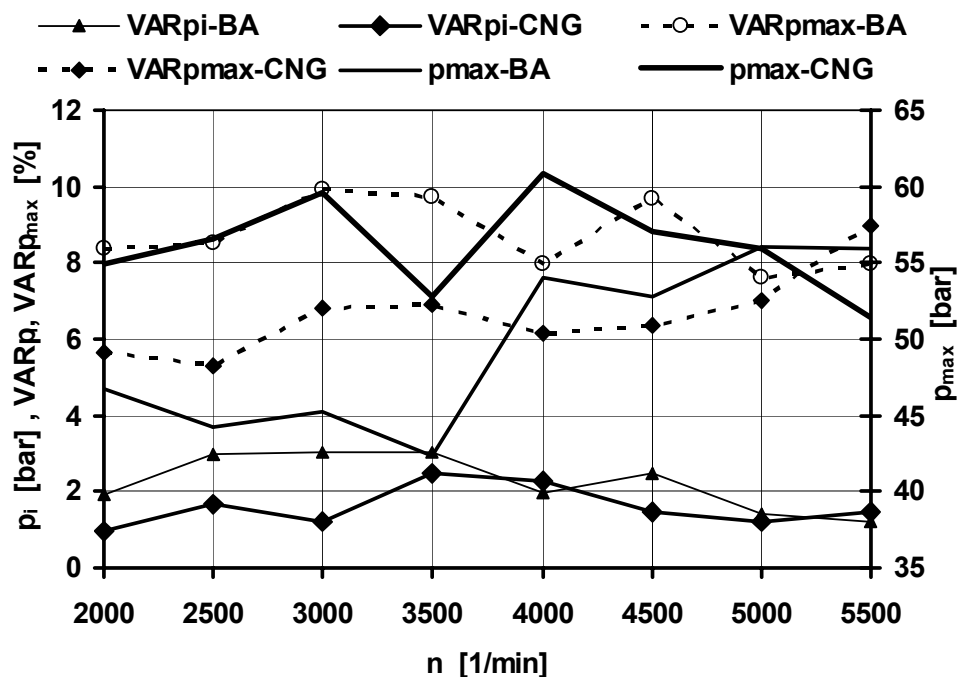
Porovnání provozních vlastností motoru při provozu na BA a NG ukazují grafické průběhy nejvýznamnějších veličin na obr.1 až 6. Zkušební motor byl pro provoz na NG vybaven palivovým systémem BRC-M.T.M. pro vícebodový vefuk NG do sacího potrubí motoru.



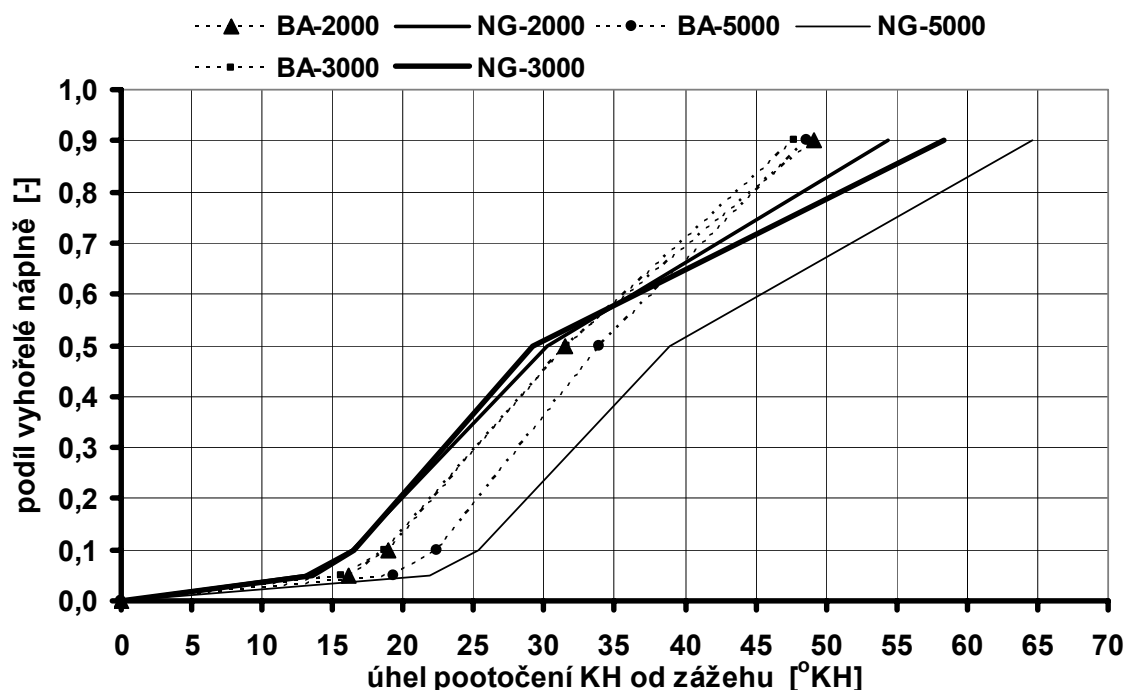
Obr.1: Průběhy hodnot středního užitečného tlaku  $p_e$  motoru v režimech vnější otáčkové charakteristiky při provozu motoru na BA a na NG. Motor při provozu na NG je seřízen pro větší předstih zážehu (při provozu na NG není riziko klepání) z hlediska zvýšení hodnoty  $p_e$  a snížení teplot výfukových plynů.



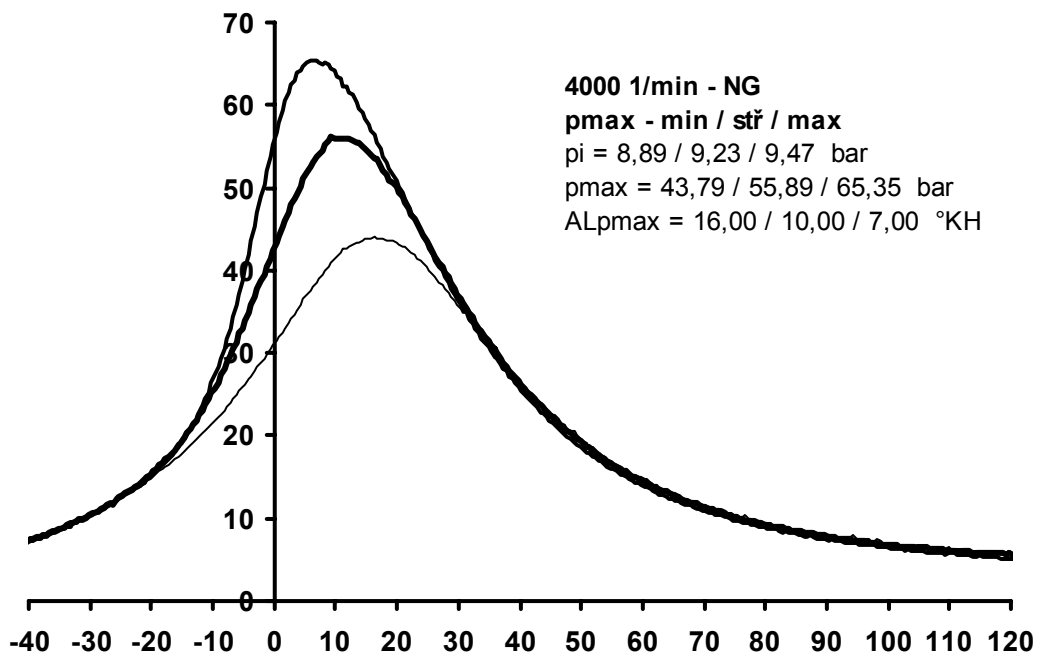
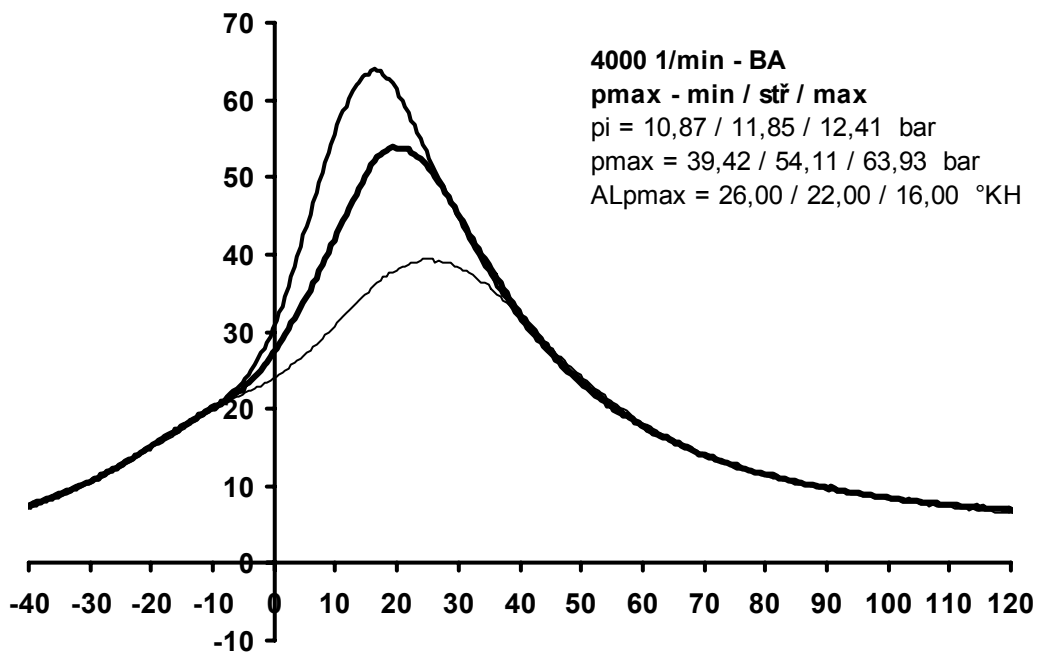
Obr.2: Seřízení bohatosti směsi motoru pro provoz na NG v režimech vnější otáčkové charakteristiky se od seřízení benzinového motoru odchyľuje blíže k hodnotám  $\lambda = 1$ . Z hlediska výkonových parametrů by bylo výhodné udržovat hodnotu  $\lambda = 1$  až do cca  $n = 4500$  1/min a teprve až v nejvyšších otáčkách směs mírně obohacovat z důvodu udržení teploty výfukových plynů pod  $t_{vyf} \cong 870$   $^{\circ}$ C. Nastavení korekcí v připojené řídicí jednotce plynového systému ale neumožňuje větší odchylky od regulačních map v řídicí jednotce benzinového motoru.



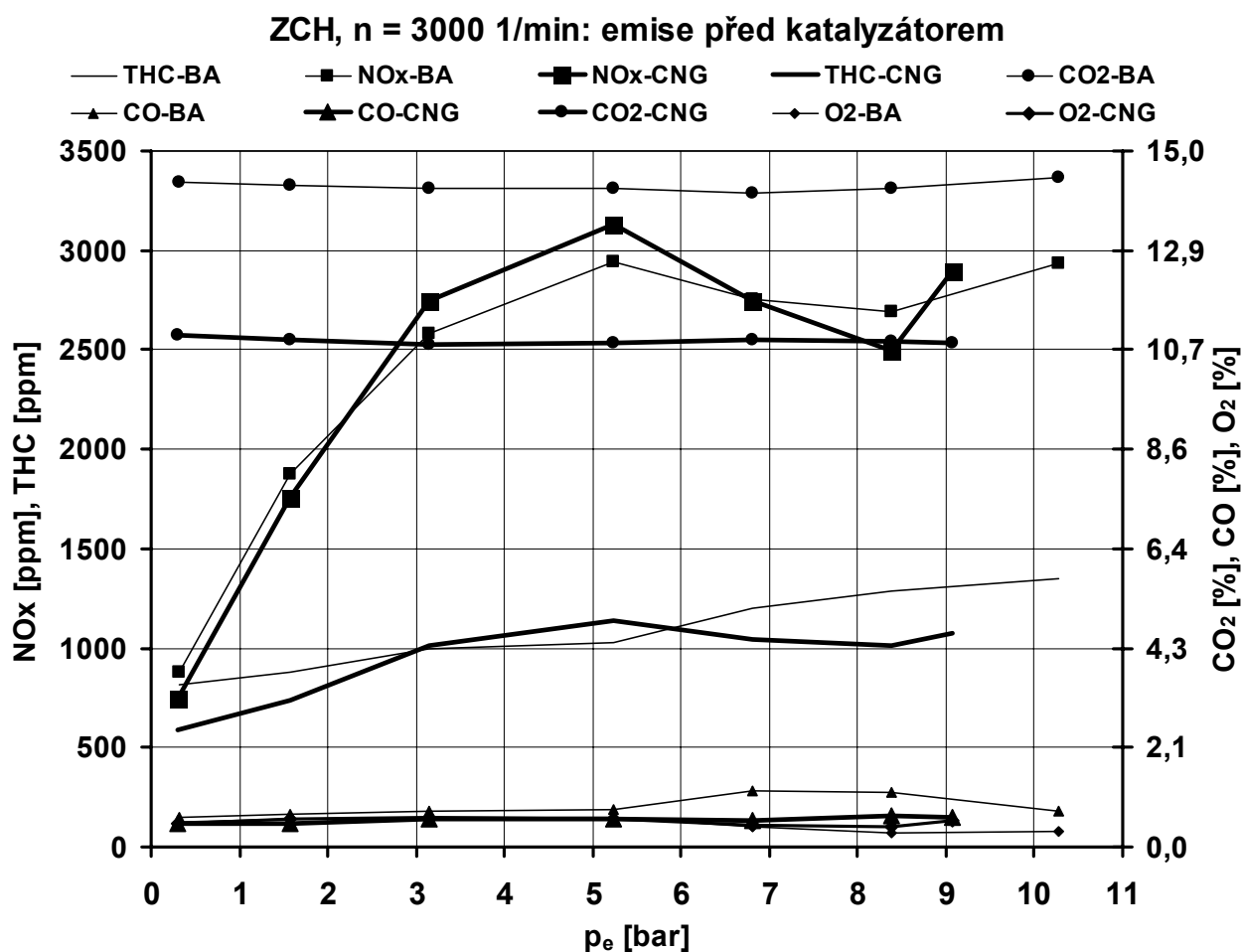
Obr.3: Parametry pracovního oběhu motoru ze statistického vyhodnocení indikátorových diagramů. Vzhledem k vyššímu předstihu zážehu motoru na NG jsou při provozu na NG vyšší hodnoty  $p_{max}$  (střední hodnoty ze souboru 150 cyklů), provoz na NG se potom vyznačuje nižší variabilitou maximálního tlaku ve válci  $VARp_{max}$  a menší je rovněž variabilita středního indikovaného tlaku  $VARp_i$  pracovního oběhu při provozu na NG.



Obr.4: Průběhy vyhořívání náplně ve válci motoru podle termodynamické analýzy indikátorových diagramů ukazují pomalejší rychlost hoření směsi NG v druhé fázi hoření. Je to pravděpodobně důsledek výrazně vyšší aktivační energie plyných paliv (zejména NG) proti benzínu a potvrzením oprávněnosti vyšších hodnot předstihu zážehu u motoru na NG.



Obr.5: Porovnání průběhů tlaku ve válci motoru ve 100% zatížení motoru při provozu na BA a NG v režimu  $n = 4000$  1/min. Zakreslené průběhy jsou vybrané ze změřeného souboru 150 po sobě následujících cyklů, výběr cyklů představuje cykly s nejvyšší, nejnižší a střední hodnotou  $p_{max}$ . Uvedené číselné hodnoty vybraných parametrů pracovního oběhu se týkají zakreslených průběhů tlaku. Průběhy ukazují celkově vyšší hodnoty tlaků ve válci a z termodynamického hlediska výhodnější polohu  $p_{max}$  k HÚ při provozu na NG (výraznější zvyšování tlaku před HÚ při provozu na NG se projevuje více na mechanickém zatížení klikového mechanismu než na snižování práce oběhu). Parametry pracovních oběhů s nejvyšší a nejnižší hodnotou  $p_{max}$  rovněž dokládají, že při provozu na NG je menší mezicyklová variabilita.



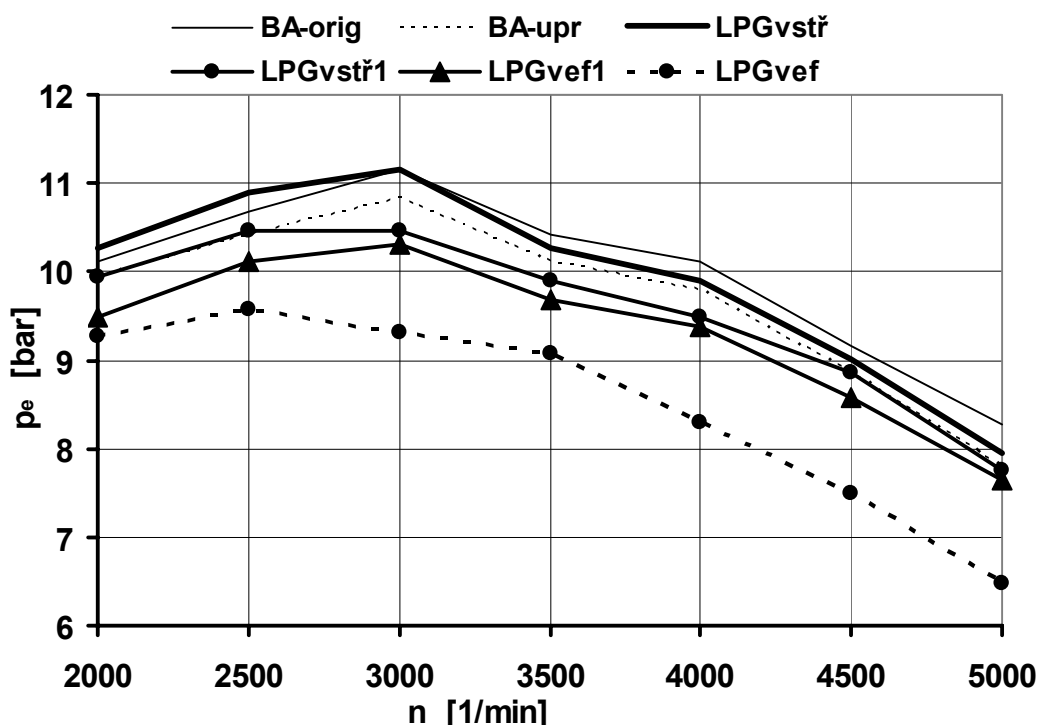
Obr.6: Koncentrace sledovaných složek ve výfukových plynech motoru při provozu na BA a NG vykazují největší odchylky v případě CO<sub>2</sub> (důsledek menšího hmotnostního podílu C v NG proti BA). Koncentrace plyných škodlivin (CO, HC a NO<sub>x</sub>) jsou ve výfukových plynech motoru provozovaného na BA i NG prakticky stejné (koncentrace HC je uváděna po přepočtu na fiktivní jednouhlíkovou molekulu), větší koncentrace CO jsou při provozu na BA v režimech obohacování směsi (cca od 50% zatížení).

O emisních vlastnostech vozidlového motoru rozhoduje účinnost katalyzátoru, která je ovlivněna seřízením bohatosti spalované směsi (zejména u složky CO, kde se její koncentrace za katalyzátorem při spalování bohatých směsí dokonce zvyšuje vlivem nedokonalé oxidace HC v katalyzátoru) a teplotou katalyzátoru. Při provozu motoru na BA jsou ve výfukových plynech při vyšších zatíženích větší zbytkové koncentrace CO, při provozu motoru na NG je nižší účinnost katalyzátoru pro nespálené uhlovodíky HC ovlivněna potřebnou vyšší teplotou pro spalování metanu a ve výfukových plynech je proto větší zbytková koncentrace HC.

I přes zvýšené zbytkové koncentrace plyných škodlivin ve výfukových plynech motoru provozovaného na BA a NG v příslušném emisním testu EHK bez problémů vyhoví. Zemní plyn je v každém případě velmi kvalitní alternativou ke klasickému automobilovému benzínu.

## Výkonové a provozní parametry motoru při provozu na LPG

Porovnání provozních vlastností motoru při provozu na BA a LPG ukazují grafické průběhy nejvýznamnějších veličin na obr.7 až 11. Zkušební motor byl pro provoz na LPG zpočátku vybaven palivovým systémem Landi-Renzo-Omegas pro vícebodový vefuk LPG do sacího potrubí motoru, později byl na motor nainstalován palivový systém Vialle pro vícebodový vstřík kapalného LPG do sacího potrubí.



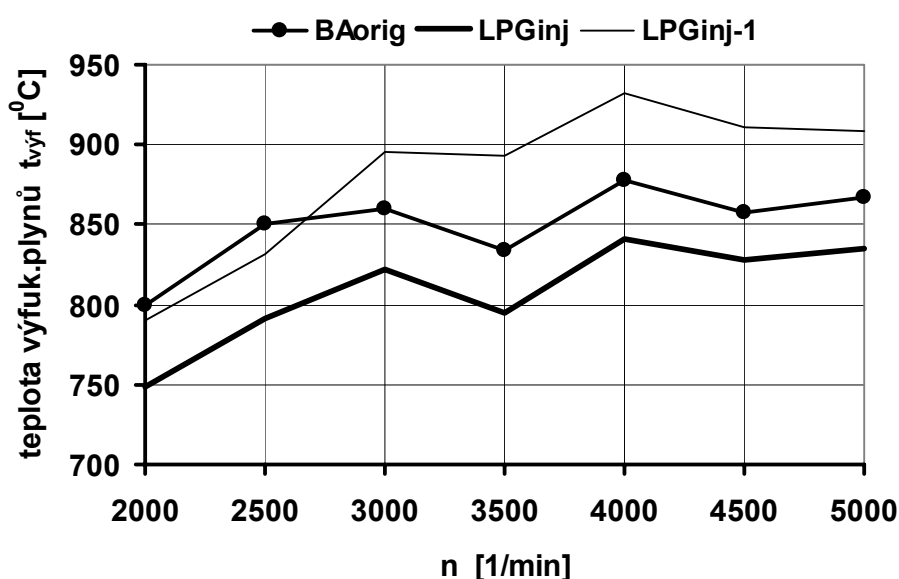
Obr.7: Průběhy hodnot středního efektivního tlaku pracovního oběhu motoru při provozu na BA a na LPG s tvořením směsi vefukem odpařeného LPG nebo vstříkem kapalného LPG do sacího potrubí motoru. V obou případech provozu motoru na LPG byl ověřován vliv regulace bohatosti směsi na výkonové a provozní parametry motoru tak, že bohatost směsi byla regulována buď podle programu v řídicí jednotce pro benzinový provoz (tj. s obohacováním směsi) nebo bylo v řídicí jednotce obohacování směsi pomocí speciálního SW vstupu odpojeno a motor pracoval ve všech režimech se směsí stechiometrického složení (tj s regulací na  $\lambda = 1$  v uzavřené smyčce podle  $\lambda$  sondy).

Při tvoření směsi vefukem odpařeného LPG do sacího potrubí je v případě obohacování směsi pokles výkonových parametrů o cca 10% (u NG je snížení o cca 15%), pokud se pracuje se směsí  $\lambda = 1$ , sníží se výkon motoru proti provozu na benzin o cca 7%.

Tvořením směsi vstřikováním kapalného LPG do sacího potrubí se výkonové parametry proti provozu motoru na BA prakticky nezmění. Zástavbou vstřikovačů LPG se ale poněkud zmenší průřez v sacím potrubí a v důsledku toho dojde ke snížení výkonu motoru při provozu na BA o cca 3%. Při provozu motoru na LPG se

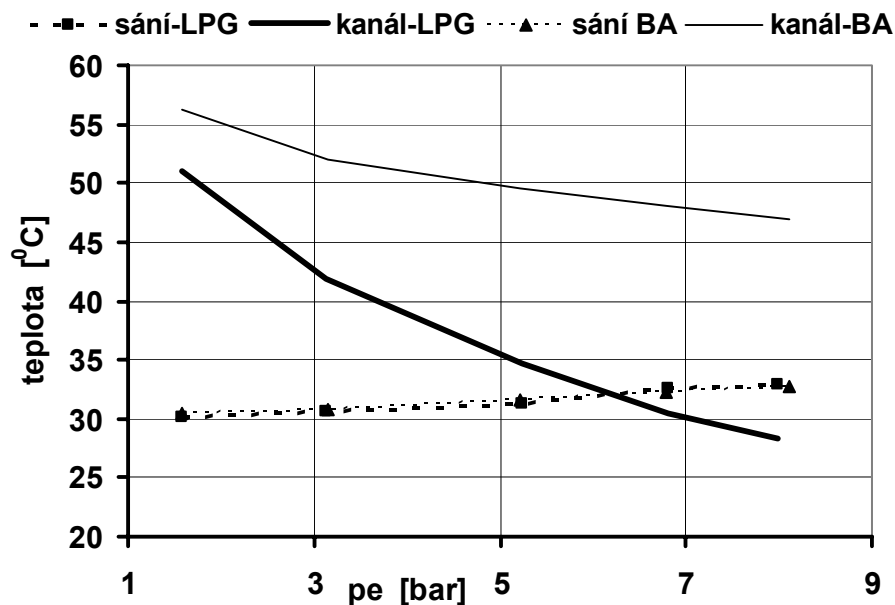
odpařováním vstřikovaného LPG snižuje teplota v sacím traktu, tím se zvyšuje hmotnostní naplnění válců a výkonové parametry motoru při provozu na LPG se proti provozu motoru na BA mohou dokonce mírně zvýšit.

Varianta tvoření směsi vstřikováním kapalného LPG se ukazuje jako perspektivní pro alternativní provoz zážehového motoru na LPG i z důvodu velmi nízké citlivosti palivového systému na nekvalitní LPG (především při vyšším obsahu těžko odpařitelných složek, které v palivovém systému pro LPG s tvořením směsi odpařeným LPG působí agresivně na pryžové díly v odpařovači a regulátoru tlaku plynu). Vzhledem k zatím malému rozšíření systémů LPG pro tvoření směsi vstřikováním kapalného LPG byl na zkušebním motoru proveden podrobnější výzkum vlastností motoru s tímto palivovým systémem: obecnější výsledky jsou v následujících grafech a obrázcích.

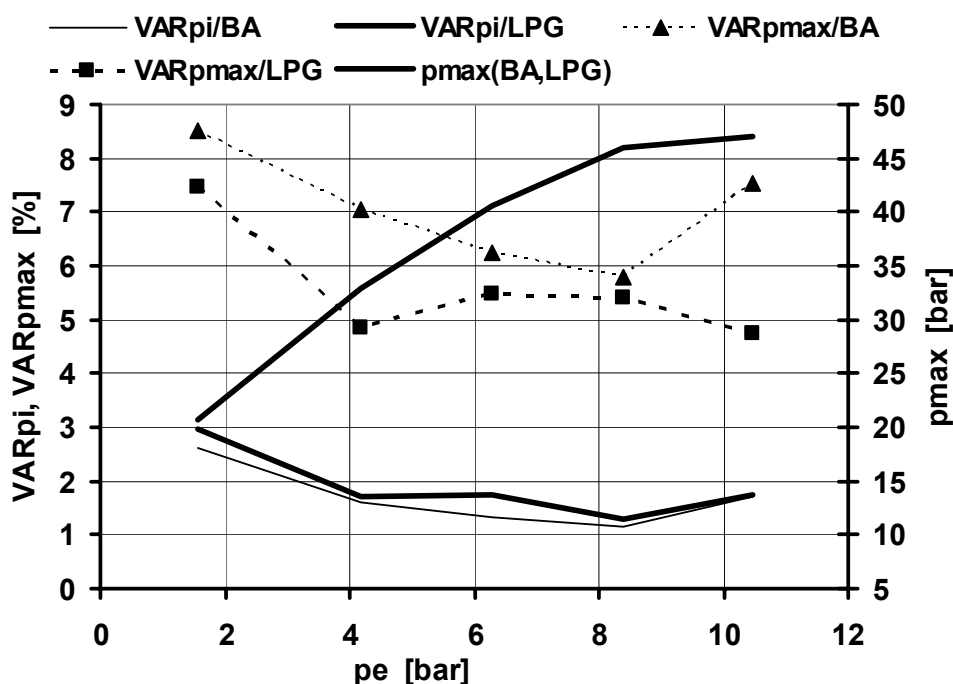


Obr.8: Průběhy teplot výfukových plynů ve vnější otáčkové charakteristice zkušebního motoru při provozu na BA-95 s originální EŘJ pro regulaci bohatosti směsi a se vstřikováním kapalného LPG s různým seřízením bohatosti spalované směsi. Při provozu na LPG s řízením bohatosti směsi podle dat v EŘJ (pro BA-95) jsou teploty výfukových plynů v celém otáčkovém rozsahu o 80-90 °C nižší. Provoz motoru na LPG se směsí  $\lambda = 1$  dává v celém průběhu otáček nejnižší hodnoty  $p_e$  (viz obr.7) a od  $n = 3000 \text{ 1/min}$  má ze všech měřených variant nejvyšší teploty výfukových plynů. Výsledek prokazuje významný vliv ochlazování nasávané směsi intenzivním odpařováním kapalného LPG po vstřiku do sacího potrubí na větší hmotnostní naplnění válce vzduchem (a tedy zvýšení hodnoty  $p_e$ ). Přebytek paliva při spalování obohacené potom směsi působí i na snížení teploty výfukových plynů. Výsledek ukazuje na možnost modifikování dat pro regulaci bohatosti spalované směsi (LPG-vzduch). Pomocí korekcí v EŘJ pro regulaci bohatosti směsi je možné dosáhnout proti variantě  $\lambda = 1$  významného snížení teploty výfukových plynů a zvýšení hodnot  $p_e$  prakticky na úroveň hodnot při provozu motoru na BA. Změnou dat v programu EŘJ pro obohacování směsi dojde i k významnému snížení spotřeby.

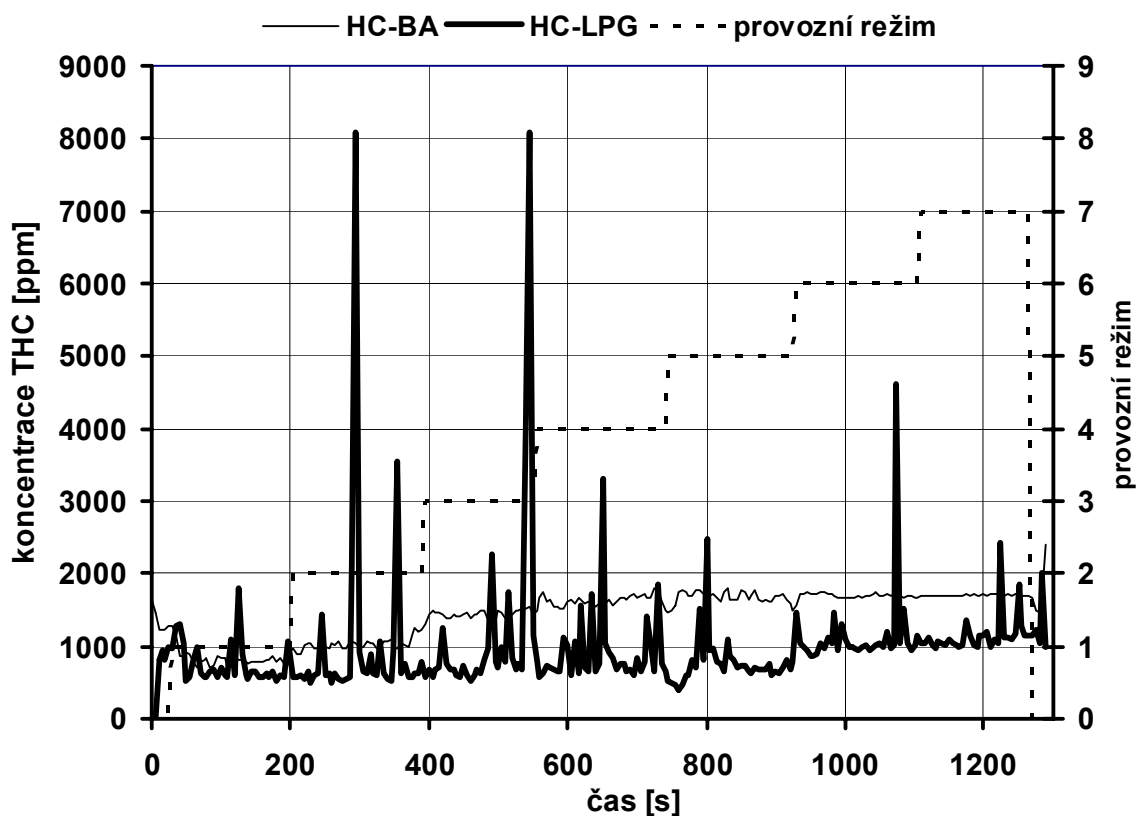




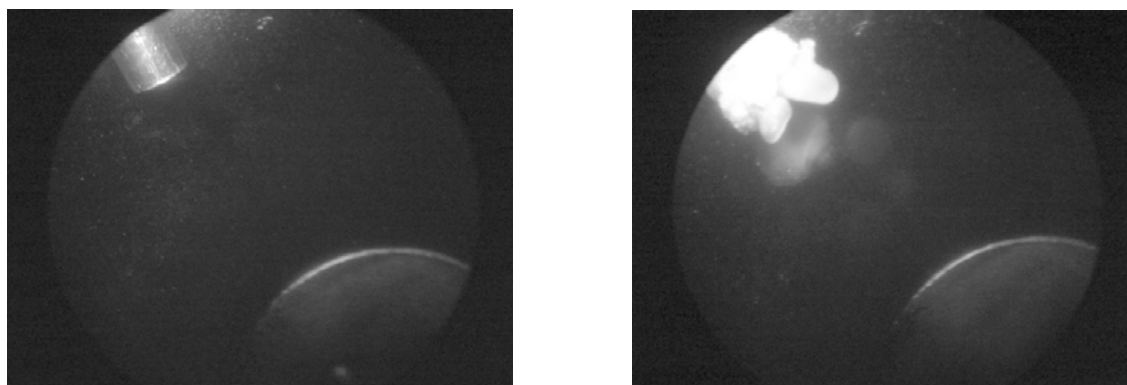
Obr.9: Teploty nasávaného vzduchu (měření v sacím filtru) a teploty v sacím kanálu (měření mikrotermočlánkem před sacím ventilem) v zatěžovací charakteristice motoru při  $n = 4750 \text{ 1/min}$  při provozu na BA a na LPG. V režimech nízkého zatížení je relativně vysoká teplota v sacím kanálu důsledkem zpětného toku spalin z válce do sacího kanálu po začátku otevírání sacího ventilu. Při provozu motoru na LPG se teplota v sacím kanálu výrazněji odchyluje od teploty při provozu na BA účinkem intenzivního odpařování vstřikovaného LPG.



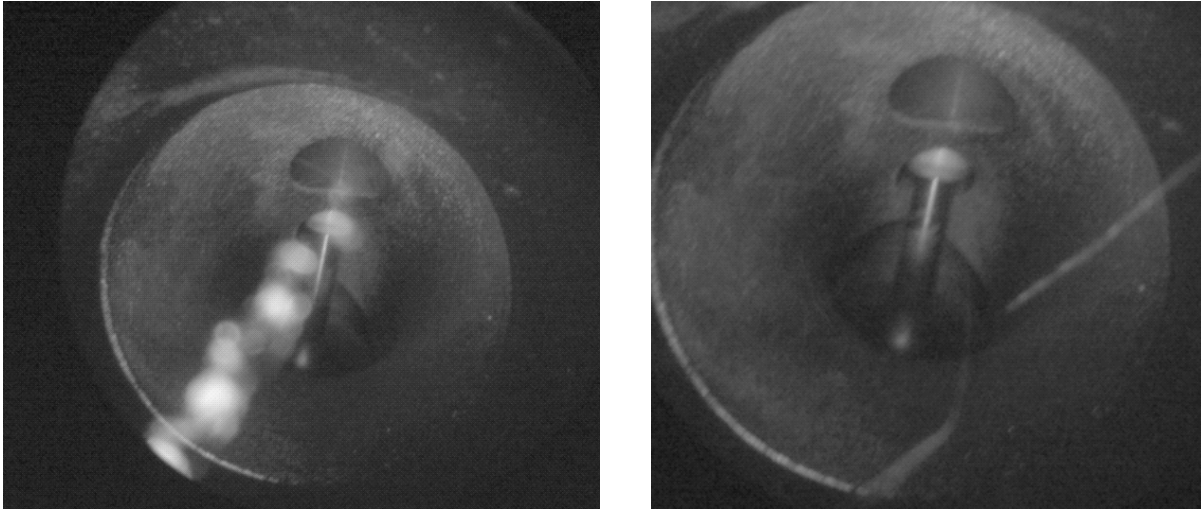
Obr.10: Při provozu motoru na BA-95 i na LPG mají  $p_{max}$  v režimech zatěžovací charakteristiky při  $n = 3000 \text{ 1/min}$  prakticky stejnou velikost, parametry mezicyklové variability pro BA-95 a LPG jsou z hlediska  $p_i$  rovněž srovnatelné, poněkud nižší mezicyklovou variabilitu pro  $p_{max}$  vykazuje provoz motoru na LPG (statistické zpracování souborů 150 po sobě následujících cyklů).



Obr.11: Při provozu motoru na LPG se náhodně objevovalo viditelné „škubnutí“, které ale nebylo na záznamu měření  $M_t$  zaznamenáno. Analyzátor nespálených HC ve výfukových plynech přitom vykazoval náhodné „píky“ vysokých koncentrací HC, při provozu motoru na BA byly koncentrace HC prakticky ustálené. Průběhy na obr.10 ukazují měřené koncentrace HC v režimech vnější otáčkové charakteristiky (sběr dat z analyzátoru je s intervalem 5s). Možná příčina takového chování motoru při provozu na LPG byla hledána ve způsobu a podmínkách tvoření směsi po vstřikování LPG. Výsledek provedeného šetření ukazují následující obrázky.

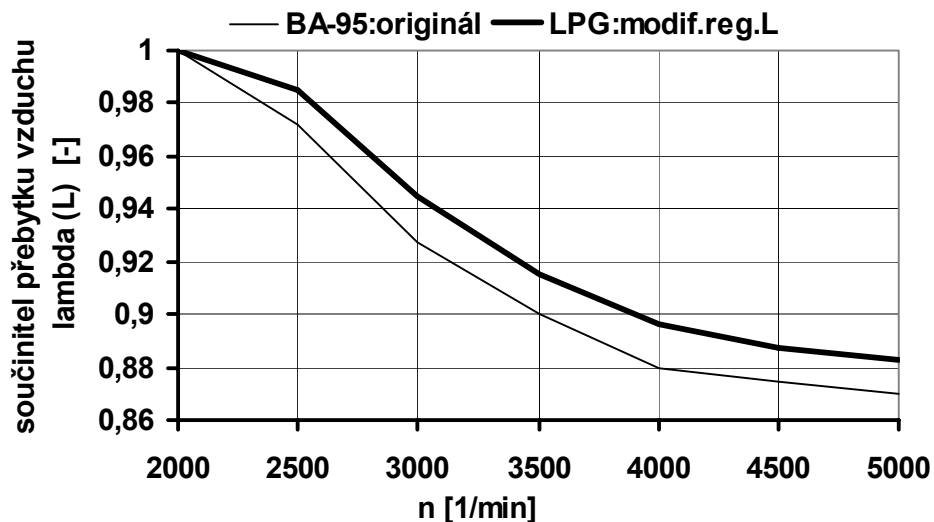


Obr.12: Pohled do sacího potrubí na koncovou část výtokové trubičky ze vstřikovače LPG: vlevo je konec trubičky u zastaveného motoru, vpravo je výtoková trubička s námrazou po krátké době provozu motoru. Námraza se postupně zvětšovala a po kouscích se oddělovala a byla zanášena vzduchem do válce motoru.

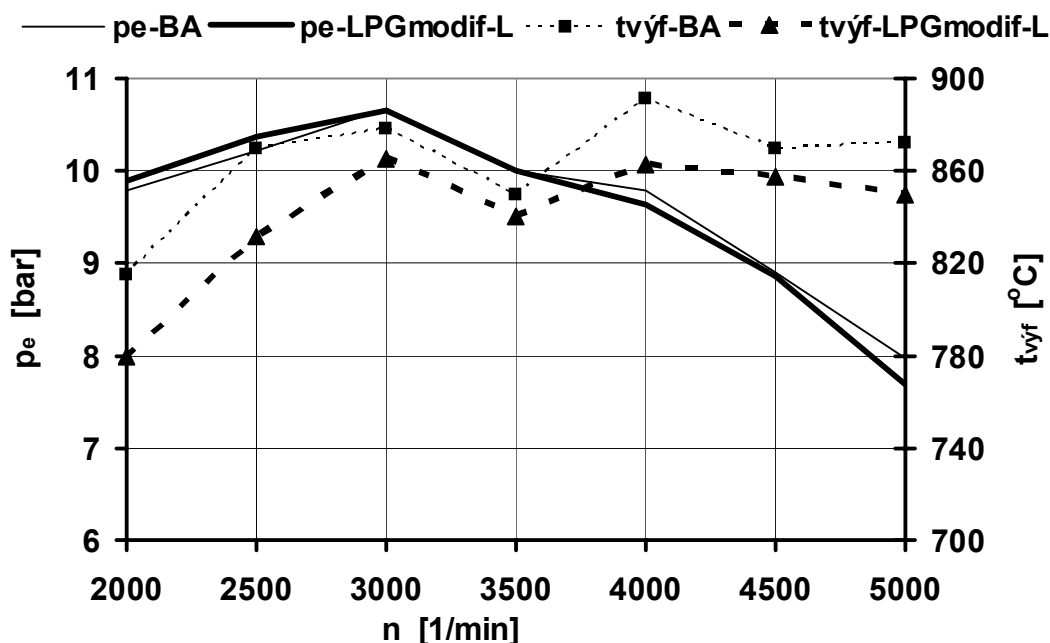


Obr.13: Pohled do sacího kanálu v hlavě válců ukazuje unášené kousky uvolněné námrazy z konce výtokové trubičky (vlevo). Na obr. vpravo jsou trajektorie malých ledových částic v nasávaném vzduchu (zřejmě ledové krystalky vytvořené ze z kondenzované vody obsažené v nasávaném vzduchu).

Zkušební motor se vstřikováním kapalného LPG vykazoval až na výše uvedené problémy velmi kvalitní výkonové a provozní parametry. Logicky byl proto výzkumný program na zkušebním motoru zakončen optimalizací regulace bohatosti směsi pro režimy vnější otáčkové charakteristiky – výsledek ukazují grafy na obr. 14 a 15.



Obr.14: Návrhový průběh regulační křivky pro řízení bohatosti směsi LPG-vzduch na vnější otáčkové charakteristice zkušebního motoru v porovnání s originální regulační křivkou pro řízení bohatosti směsi při provozu motoru na BA. Snížené obohacení směsi lze ale aplikovat pouze při provozu motoru na LPG, provoz motoru na BA musí respektovat původní data pro obohacování směsi (snížené obohacení při provozu na BA vede k poklesu středního indikovaného tlaku oběhu a zvýšení teploty výfukových plynů).



Obr.15: Regulace bohatosti při provozu motoru na LPG zajišťuje  $t_{vyf} \leq 860 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , výkonové parametry motoru při provozu na LPG jsou prakticky shodné s výkonem původního motoru na BA a snížené obohacení směsi současně snižuje měrnou spotřebu motoru při provozu na LPG.

Zkušební motor s tvořením směsi vícebodovým vstřikováním kapalného LPG do sacího potrubí (palivový systém Vialle) vykazuje ze všech vyšetřovaných variant motoru při provozu na LPG nejvýhodnější vlastnosti (výkonové, emisní, účinnostní, teplotní). Měření prokázala, že účinnost katalyzátoru v režimech spalování stechiometrických směsí je při provozu na BA i na LPG relativně vysoká, v režimech spalování bohatých směsí (při vysokých zatíženích motoru) je účinnost katalyzátoru na HC nižší při provozu na LPG než při provozu na BA. Emise HC při provozu na LPG jsou však srovnatelné s emisemi HC při provozu na BA (při provozu na LPG jsou koncentrace HC ve výfukových plynech na vstupu do katalyzátoru nižší proti provozu na BA a proto jsou výsledné emise HC při provozu na LPG a BA srovnatelné). Emise  $\text{NO}_x$  jsou při provozu motoru na LPG i BA srovnatelné.

Z hlediska spotřeby paliva ale i výfukových emisí je žádoucí změna regulace bohatosti směsi při provozu motoru na LPG: řešení úprav v EŘJ motoru musí při provozu na BA zajistit regulaci bohatosti směsi podle originálního programu pro BA.

## Závěr

Konverze vozidlového benzinového motoru pro provoz s přepínáním na alternativní paliva NG nebo LPG musí být provedena s komplexní optimalizací seřízení motoru pro provoz na alternativní palivo.

*Publikace byla vytvořena v rámci projektu Výzkumného centra Josefa Božka (č. 1M68400770002), podporovaného MŠMT ČR.*

# SPARK-IGNITION VEHICLE ENGINE PROPERTIES IN OPERATION ON AN ALTERNATIVE GASEOUS FUELS CNG AND LPG

*Prof. Ing. Stanislav Beroun, CSc., Ing. Josef Blažek,  
Ing. Radek Holubec, Ing. Jan Mareš, Ing. Marcel Vencel  
Technical University of Liberec*

**Czech republic**

## **Summary**

*The paper summarizes the results of several research projects on modern spark-ignition vehicle engines converted to operate either on gasoline (petrol) or on an alternative gaseous fuel (CNG or LPG). The operation on gaseous fuels was accomplished using multi-point sequential fuel injection into the intake manifold and electronic control of air-fuel ratio and ignition timing, similar to the original gasoline engine system. The focus of the projects was performance and emissions characteristics of the engine and working cycle parameters for both gasoline and gaseous fuels. The measurements were performed on an engine dynamometer with an automated data acquisition system. Instrumentation and computational resources for high-pressure indication allowed detailed study of the cylinder charge combustion dynamics and of the variability in combustion chamber pressures among individual cycles. Digital visual technology was used for studies of air-fuel mixture formation in the intake manifold during operation on liquid LPG.*