

# **Experimentální průzkum chování spalovacího motoru v závislosti na složení vyčištěného bioplynu**

ČOV spol. s r.o. ve spolupráci s FS ČVUT

Listopad 2013

---

## 1. Obsah a použitá označení

1. Obsah a použitá označení.....	2
2. Vymezení problematiky.....	5
3. Kalkulace s použitím tabelovaných údajů složek paliva.....	7
4. Pracovní oběh a energetické parametry motoru.....	10
5. Emisní chování motoru.....	16
6. Možnosti kompensace dopadů přítomnosti CO <sub>2</sub> v palivu.....	19
7. Plynový zážehový motor s chudou koncepcí.....	23
8. Plynový vznětový motor.....	25
9. Možnosti testování motoru při provozu na částečně čištěný bioplyn.....	28
10. Shrnutí.....	35
11. Reference.....	37
12. Přílohy (elektronicky).....	38

## Použitá označení a symboly

$\lambda$	Součinitel přebytku vzduchu
AL1Z	Okamžik zážehu (záporné hodnoty $\equiv$ před horní úvratí)
bmep	Střední efektivní tlak
bshc	Měrná spotřeba tepla
CA	Uhel otočení klikového hřídele (0 $\equiv$ Horní úvrať kompresního zdvihu)
CAxx	Uhel natočení klikového hřídele, při kterém došlo ke spálení xx % náplně válce
CO	Molární zlomek oxidu uhelnatého v suchých spalínách
CO2int	Molární zlomek oxidu uhličitého v pracovní látce v plnicím traktu motoru
COV	Variační součinitel
dQnm	Okamžitá hodnota derivace normalizovaného výkonu tepla
EGR	Hmotnostní podíl necirkulujících spalin v pracovní látce
HC	Molární zlomek metanu v suchých spalínách
EoE	Využitelná energie na výstupu z motoru
Hu	Spodní výhřevnost paliva
HuMx	Výhřevnost směsi (při součiniteli přebytku vzduchu = 1)
IMEP, imep	Střední indikovaný tlak
LtAir	Teoretická spotřeba vzduchu v kg/kg
mCO2	Měrná emise oxidu uhličitého
NO	Molární zlomek oxidu dusnatého v suchých spalínách
OtO2 [	Teoretická spotřeba kyslíku v mol/mol ( $m^3/m^3$ )
pCyl	Okamžitý tlak ve válci motoru
Pe	Efektivní výkon motoru
Pi	Indikovaný výkon
pMAX	Špičkový tlak oběhu
QEXH	Teplo odvedené z motoru entalpií spalin
Qfex	Energetická ztráta nedokonalou oxidací paliva
Qnm	Okamžitá hodnota normalizovaného výkonu tepla
Qpart	Komponenta tepelné bilance

QPHC	Teplo odvedené stěnami pracovního prostoru motoru
$\rho_0$	Normální hustota paliva
$\rho_{mix}$	Hustota směsi (při součiniteli přebytku vzduchu = 1)
StD	Standardní deviace
$T_{cyl}$	Okamžitá teplota ve válci motoru
TMAX	Špičková teplota oběhu
$v_{CO_2}$	Objemový obsah oxidu uhličitého v palivu

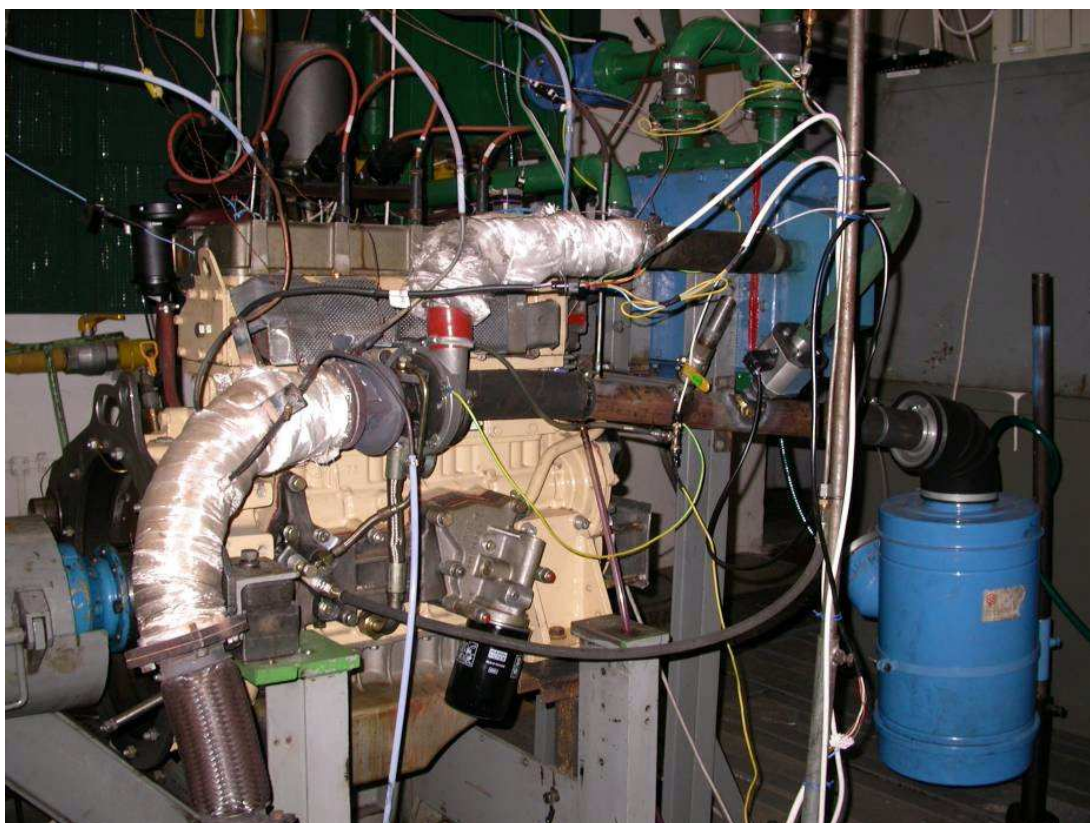
## 2. Vymezení problematiky

Studie analyzuje možnosti využití částečně rafinovaného bioplynu jako paliva pro motorová vozidla. Předmětem zájmu je dopad přítomnosti oxidu uhličitého v palivu na vlastnosti motoru / vozidla z hlediska uživatele. Studie se nezabývá vlivem přítomnosti dalších složek bioplynu, protože se předpokládá, že bude použité palivo již standardně využívané jako palivo pro stacionární motor, který je (často) součástí bioplynové stanice.

Část výstupů je odvozena z tabelovaných údajů relevantních komponent paliva, část se opírá o experimentální a simulační poznatky k předmětné problematice. Protože experimentální výsledky se používají pro odvození obecných zákonitostí, případně jako ilustrace dílčích konstatování, není ve zprávě paragraf věnovaný popisu měřeného objektu a experimentálních technologií a postupů.

Pro srozumitelnost některých částí dalšího textu nutno pouze vypíchnout, že do sacího traktu testovacího motoru je možno kromě základního paliva (transitní zemní plyn, jehož relevantní vlastnosti jsou považovány za identické s čistým metanem) řízeně přivádět oxid uhličitý. Nastavováním průtoku  $\text{CO}_2$ , tedy lze i za běhu motoru měnit poměr množství do motoru přivedeného metanu a oxidu uhličitého a emulovat tak různá složení bioplynu.

Experimenty byly prováděny s maximální přípustí  $\text{CO}_2$  takovou, aby podíl  $\text{CO}_2$  / ( $\text{CH}_4$  +  $\text{CO}_2$ ) byl větší než 25 % (obj.), jak bylo požadováno zadáním. To umožňuje interpolovat relevantní výstupy, případně akcentovat některé (jinak příliš subtilní) dopady přítomnosti  $\text{CO}_2$  v palivu. Dodaný vzorek bioplynu měl obsah  $\text{CO}_2$  38 % (obj.). Experimenty probíhaly za dozoru týmu prof. Michala Takátse v poloprovozních podmínkách na motoru umístěném na Fakultě strojní ČVUT / Centru vozidel udržitelné mobility, a to v říjnu 2013.



Obr. 1 – testovací motor

### 3. Kalkulace s použitím tabelovaných údajů složek paliva

Výpočty, jejichž výsledky se uvádějí v tomto odstavci byly provedeny s použitím látkových vlastností komponent podle [1]. Za normální stav se považuje tlak 101325 Pa a teplota 0°C. V souladu s běžnými zvyklostmi se předpokládá, že molární a objemové zlomky komponent jsou identické.

Předpokládá se, že vyšetřovaným palivem je směs metanu a oxidu uhličitého bez přítomnosti dalších komponent. Vlastnosti takového směsného paliva v závislosti na obsahu CO<sub>2</sub> se uvádějí v tabulce.

vCO <sub>2</sub> [%vol]	0	5	10	15	20	25	30
Hu [MJ/m <sup>3</sup> ]	35.82	34.03	32.24	30.45	28.66	26.86	25.07
Hu [MJ/kg]	50.04	43.73	38.35	33.72	29.68	26.14	23.00
ro [kg/m <sup>3</sup> ]	0.72	0.78	0.84	0.90	0.97	1.03	1.09
OtO <sub>2</sub> [mol/mol]	2.00	1.90	1.80	1.70	1.60	1.50	1.40
LtAir [kg/kg]	17.24	15.06	13.21	11.62	10.23	9.00	7.92
HuMx[MJ/m <sup>3</sup> ]	3.396	3.379	3.360	3.340	3.317	3.292	3.263
HuMx[MJ/kg]	2.744	2.722	2.699	2.673	2.644	2.613	2.578
romx[kg/m <sup>3</sup> ]	1.238	1.241	1.245	1.250	1.254	1.260	1.266

**Výhřevnost paliva** na jednotku objemu je relevantní z hlediska uskladnění zásoby paliva na vozidle a z hlediska průtokového dimenzování palivové tratě. Mění se přímo úměrně obsahu metanu v palivové směsi.

Negativní dopad přítomnosti nehořlavé složky v palivu na **velikost uskladněné zásoby paliva** je hlavní nevýhodou při použití částečně rafinovaného bioplynu jako motorového paliva z hlediska koncového uživatele. Tato negativní okolnost se nedá žádným způsobem kompenzovat. Navíc může být případně akcentována požadavkem na snížení přípustného tlaku v zásobníku paliva na vozidle, pokud

takový požadavek vznikne kvůli zamezení přítomnosti kapalné fáze CO<sub>2</sub> uvnitř zásobníku.

Přiměřeně snížení obsahu metanu v palivu se zvyšují i nároky na průtok paliva do motoru. Konkrétní dopad této okolnosti je závislý na použité strategii tvorby směsi a její implementací jak fyzickými komponentami palivové aparatury, tak řídicím algoritmem.

U motoru s **řízeným katalytickým systémem** (= uspořádání v současnosti běžné u většiny benzinových motorů a z nich odvozených plynofikovaných verzí) se správné odměření paliva ustaví automaticky v rámci jejího zpětnovazebního řízení podle signálu z  $\lambda$ -sondy, pokud odměřovací orgán má vestavěnou dostatečnou rezervu průtoku. Kritickou okolností může být otvírací doba injektorů u všech systémů s injektáží paliva. Schopnost zvládnout požadované navýšení průtoku palivová nutno ověřit u každého konkrétního motoru / vozidla.

V případě že rezerva není dostatečná, nelze příslušnou palivovou směs použít, neboť dojde k narušení správné funkce dodatečné úpravy spalin a výraznému zvýšení emise NO<sub>x</sub>, která je sledovanou škodlivinou.

U zážehového motoru s **chudou koncepcí** hrozí při zachování velikosti odměřovacího průřezu paliva (resp. jeho časového průběhu v případě časované dodávky paliva) nadměrné ochuzení směsi s důsledkem (případně už neakceptovatelného) zvětšení nerovnoměrnosti běhu a případného úplného zhroucení spalovacího procesu. Tato situace může nastat i v případě, že přípuště paliva do motoru je automaticky řízena, ale palivová aparatura nemá dostatečné dimenzování pro zajištění požadovaného zvýšení průtoku.

Obdobná situace nastává u motoru se **zapalováním vstřikem** malého množství zapalovacího paliva (nafty) při provozu na vnější rychlostní charakteristice. Vzhledem k použití kvalitativní regulace výkonu, jak je u těchto motoru typické, při částečném zatížení se změněná přípuště hořlavé složky paliva projeví pouze změnou vztahu mezi



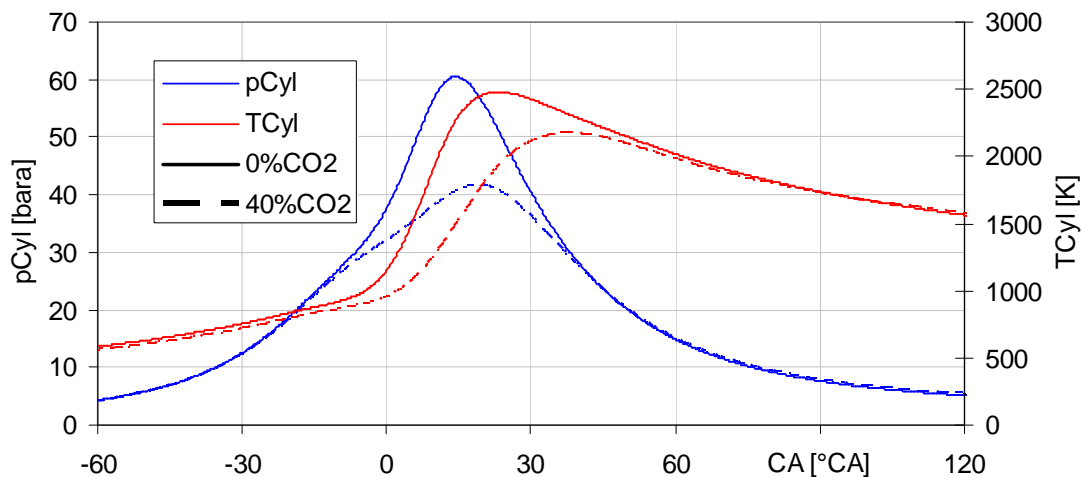
polohou pedálu akcelérátoru a aktuálním výkonem. Tato skutečnost patrně nenaruší funkčnost vozidla a není nutno jí jakkoli kompenzovat.

**Výhřevnost směsi** definuje dosažitelný měrný výkon motoru v daném provozním režimu. Její průběh v závislosti na obsahu CO<sub>2</sub> v palivové směsi je podstatně méně strmý než v případě výhřevnosti samotného paliva. Např. při obsahu oxidu uhličitého 25 % (objemově) se výhřevnost směsi sníží na 97 % hodnoty pro čistá metan.

Snížení výkonu motoru pracujícího na částečně rafinovaný bioplyn není významné. U některých konfigurací lze i toto nevýznamné snížení kompenzovat (např. zvýšením plnicího tlaku a u motorů s regulovanou plnicí skupinou), pravděpodobně však složitost požadované regulační intervence nebude vyvážena dosaženým pozitivním efektem.

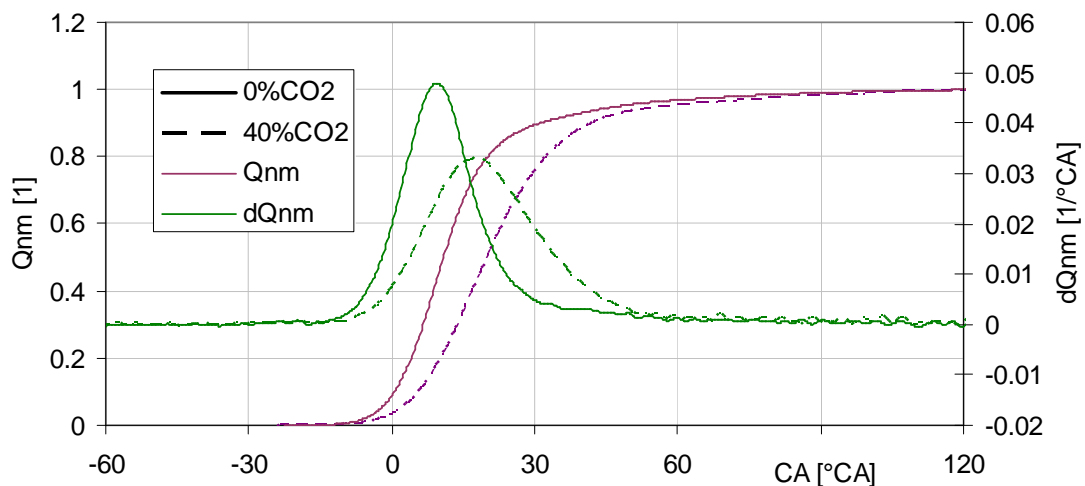
Konstatování, uvedená v tomto paragrafu jsou odvozena kvantitativně ze základních vztahů hmotové a energetické bilance. Z hlediska chování motoru, zejména jeho pracovního oběhu jsou ovšem relevantní i další vlastnosti paliva, jejichž vliv není dostupný jednoduchému posouzení, vycházejícímu z tabelovaných vlastností složek.

#### 4. Pracovní oběh a energetické parametry motoru



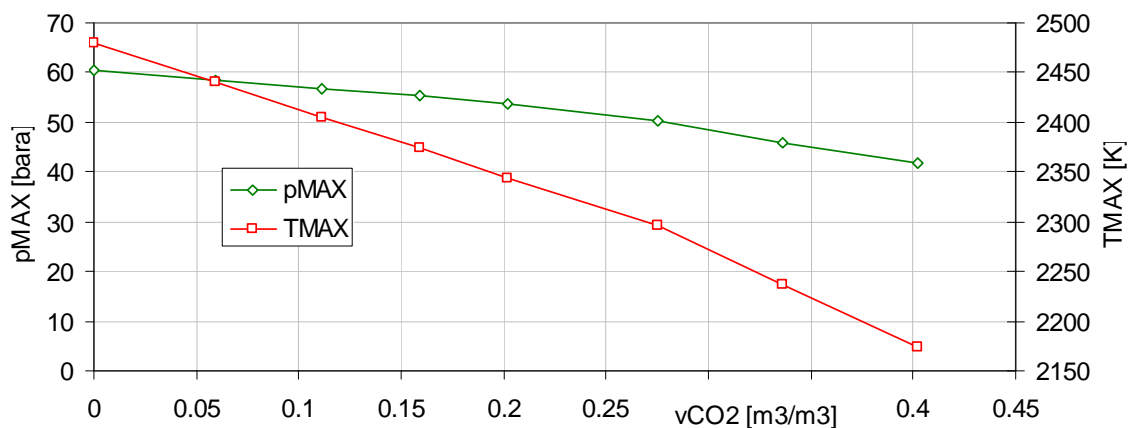
Obr. 1 Průběh tlaku a teploty ve válci motoru

Pro ilustraci specifík chování pracovního oběhu motoru byla použita experimentální data naměřená na přeplňovaném motoru  $4 \times \varnothing 102 / 120$  s řízeným katalytickým systémem ( $\lambda = 1$ ). Data byla zaznamenána při provozu motoru s částečně přivřenou škrticí klapkou. Zatížení motoru přibližně odpovídá provozu motoru s atmosférickým plněním při plně otevřené škrticí klapce. Konstatování tohoto paragrafu jsou tedy platná pro zážehové motory s atmosférickým plněním a pro přeplňované motory, při běhu na částečné zatížení. Všechna měření byla provedena při otáčkách 1800 /min.



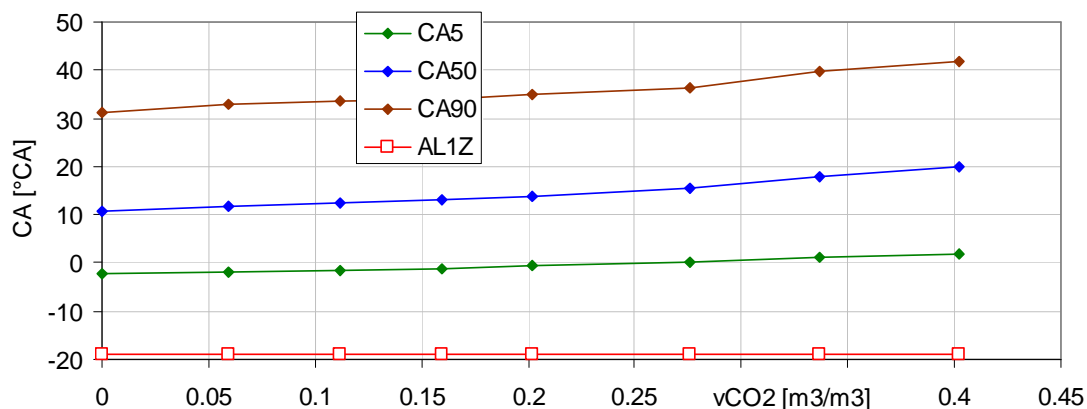
Obr. 2 Průběh vývinu tepla

Pro zvýraznění rozdílnosti v chování pracovního oběhu v závislosti na přítomnosti  $CO_2$  v palivu se vykreslují na Obr. 1 a Obr. 2 úhlově indexované průběhy relevantních veličin, vyhodnocené ze záznamu indikace tlaku ve válci při obsahu  $CO_2$  40 % v porovnání se stavem při běhu motoru na čistý tranzitní zemní plyn (jehož vlastnosti lze s dostatečnou vypovídací schopností považovat za identické s čistým metanem).



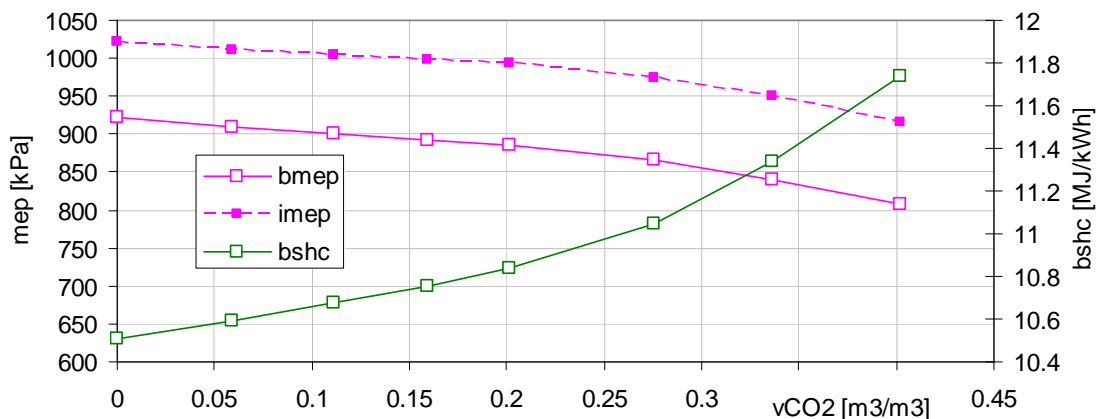
Obr. 3 Průběh špičkového tlaku a teploty

Z průběhů stavových vlastností pracovní látky během vysokotlaké části pracovního oběhu lze jednoznačně odvodit zpomalení hoření vlivem přítomnosti  $\text{CO}_2$  v palivu. Maximální tlak a teplota ve válci se snižují (Obr. 1) a průběh vývinu tepla vykazuje menší strmost než v případě bez přítomnosti oxidu uhličitého (Obr. 2).



Obr. 4 Průběh charakteristických bodů vývinu tepla (tzv. fázování hoření)

Kvantitativní posouzení závislosti rychlosti hoření na obsahu oxidu uhličitého v palivové směsi lze odvodit z průběhu špičkových hodnot tlaku a teploty (Obr. 3). Numericky lze vyjádřit rychlost vývinu tepla jako integrální parametr pracovního oběhu vyčíslením úhlu otočení klikového hřídele v okamžiku spálení jistého definovaného podílu náplně válce. Bod, v němž je právě spálených 5 % náplně válce charakterizuje průtah zážehu. Úhlový interval mezi shořením 5 a 90 % náplně charakterizuje samotnou délku spalovacího procesu. Při optimalizaci časování průběhu vývinu tepla se za osvědčenou univerzální směrnicí považuje nastavení 50 %-ního bodu na hodnotu  $10^\circ$  za HU.

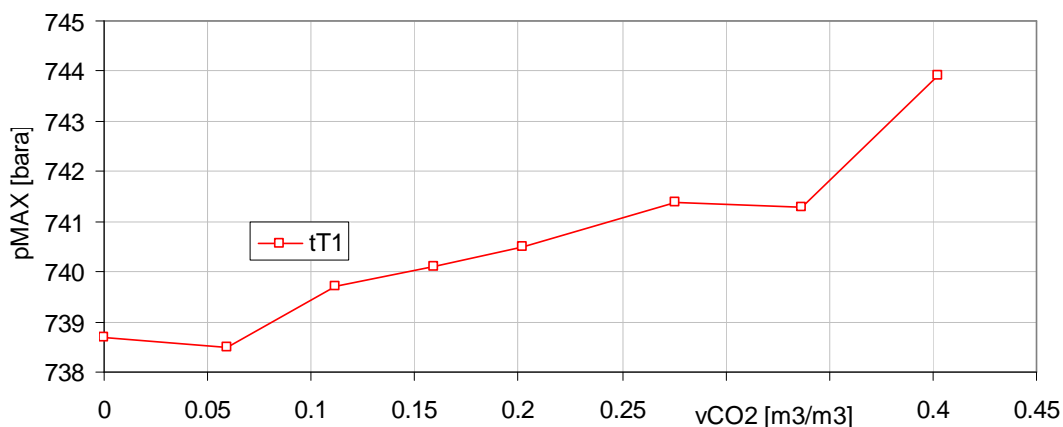


Obr. 5 Průběh energetických parametrů motoru

S postupným zvyšováním přídavku CO<sub>2</sub> se při neproměnném časování zážehu všechny úhlové intervaly, charakterizující dobu a průběh spalování průběžně prodlužují (Obr. 4). Negativním poznatkem je zejména prodloužení pozdějších fází spalovacího procesu (křivky na Obr. 4 divergují – tzv. pomalé dohořívání), protože tuto okolnost nelze plně kompenzovat zvětšením úhlu předstihu zážehu.

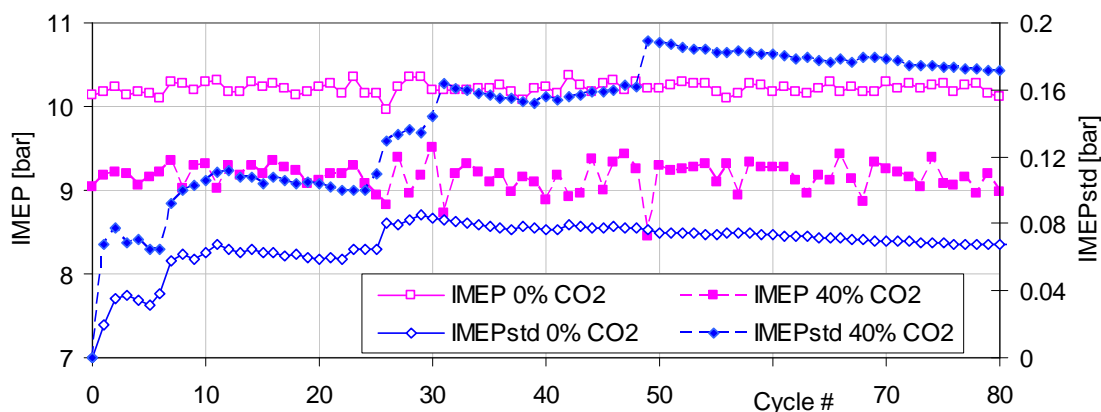
Negativním důsledkem pomalejšího hoření je zvýšení měrné spotřeby tepla (tedy zhoršení účinnosti motoru) a pokles měrného výkonu (vyjádřený např. hodnotou středního efektivního tlaku) strmější než odpovídá (v paragrafu 0 teoreticky stanovenému) snížení výhřevnosti směsi (Obr. 5). Průběhy byly naměřeny při časování zážehu optimalizovaném na provoz bez přítomnosti CO<sub>2</sub> v palivu.

V Obr. 5 se uvádí též průběh středního indikovaného tlaku. Smyslem je doložit dostatečnou vypovídací schopnost této fyzikální veličiny jako identifikátoru měrného výkonu motoru. Tato veličina je zjistitelná (byť za cenu nasazení sofistikované měřicí aparatury a postupů) i v terénních podmínkách (bez nutnosti instalace motoru na brzdovém stanovišti). Diskuse k využití portabilní indikační aparatury je uvedena v paragrafu 9.



Obr. 6 Průběh teploty výfukových plynů na výstupu z motoru

Vlivem prodloužení hoření s rostoucím podílem CO<sub>2</sub> v palivu se zvyšuje teplota výfukových plynů. Tento fenomén je nevýrazný (na mezi přesnosti měření - Obr. 6).



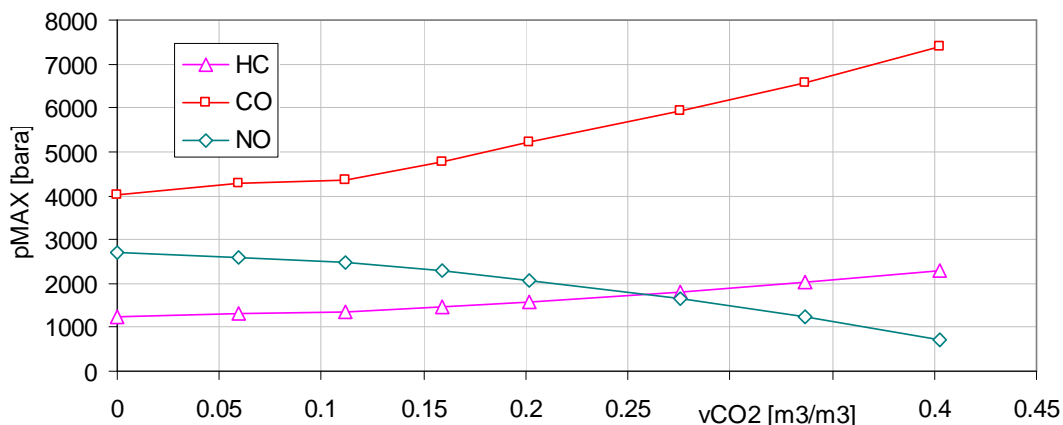
Obr. 7 Mezioběhová variabilita

Přítomnost CO<sub>2</sub> v palivu zvyšuje mezicyklovou variabilitu. Vizuálně lze tuto okolnost posoudit z průběhu hodnot středního indikovaného tlaku pro jednotlivé oběhy ze záznamu 80-ti konsekutivních oběhů (Obr. 7). Průběhy standardní deviace středního indikovaného tlaku v závislosti na počtu oběhů vstupujících do vyčíslení dokladují

dostatečnou vypovídací schopnost vyšetřovaného vzorku. Příslušné hodnoty variačního součinitele jsou:

$$\text{COV}_{\text{IMEP},0} = 0.67 \% \quad \text{COV}_{\text{IMEP},40} = 1.88 \%$$

## 5. Emisní chování motoru

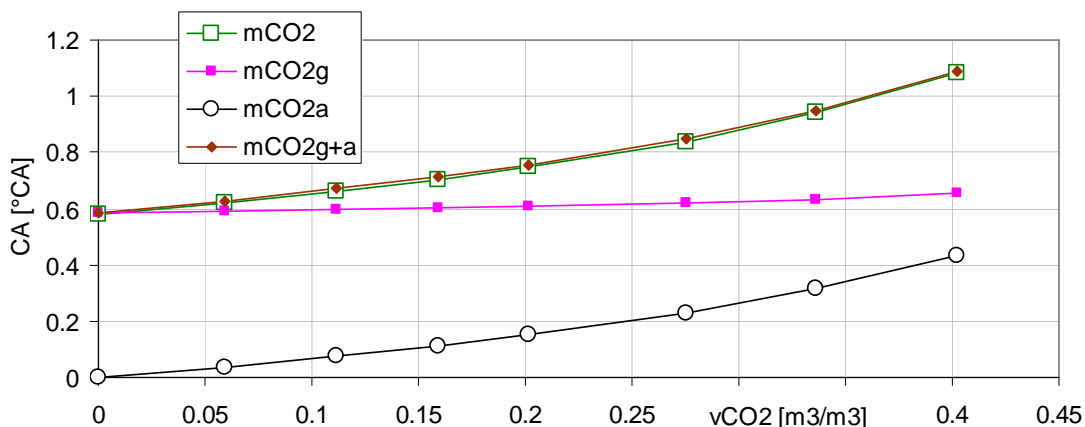


Obr. 8 Průběh molárních zlomků sledovaných škodlivin v suchých spalínách

Obsah produktů nedokonalé oxidace v surových spalínách se s rostoucím obsahem CO<sub>2</sub> v palivu zvyšuje jako další důsledek odchylky kvality spalování od optima. Zdánlivě příznivým důsledkem snížení teplotní úrovně pracovní látky v průběhu vysokotlaké části oběhu je snížení obsahu oxidů dusíku v surových spalínách. Změny jsou nevýznamné (Obr. 8) a správně fungující dodatečná úprava spalin bude s vysokou pravděpodobností schopna zajistit snížení koncové emise na úroveň stavu, na který byl optimalizován motor a jeho příslušenství při předpokládaném provozu bez přítomnosti CO<sub>2</sub> v palivu.

Otázka emise oxidu uhličitého vyžaduje jistou analýzu. Celkové emitované množství CO<sub>2</sub> obsahuje jednak oxid uhličitý vzniklý oxidací metanu, jednak oxid uhličitý původně obsažený v přivedené palivové směsi, který v nezměněném množství participuje na celkovém průtoku spalin.





Obr. 9 Emise oxidu uhličitého

Pro účely analýzy emise CO<sub>2</sub> se předpokládá celkový hmotnostní tok CO<sub>2</sub> z oxidace metanu jako 2.75 – násobek změřené hmotnostní spotřeby zemního plynu. Předpokládá se tedy (zjednodušeně), že palivem je čistý metan a při spalování v motoru dochází k jeho dokonalé oxidaci. Celkový hmotnostní tok CO<sub>2</sub>, přiváděný do sání motoru je stanoven přímým měřením. To umožňuje stanovení měrné emise oxidu uhličitého z oxidace metanu (MCO<sub>2</sub>g v Obr. 9) a měrné emise oxidu uhličitého z jeho přívodu jako nespalitelné složky paliva (mCO<sub>2</sub>a). Jejich součet pak lze porovnat s celkovou měrnou emisí CO<sub>2</sub>, stanovenou jako součin ve spalinách naměřeného molárního zlomku CO<sub>2</sub>, celkového objemového průtoku spalin a hustoty CO<sub>2</sub> (mCO<sub>2</sub> v Obr. 9).

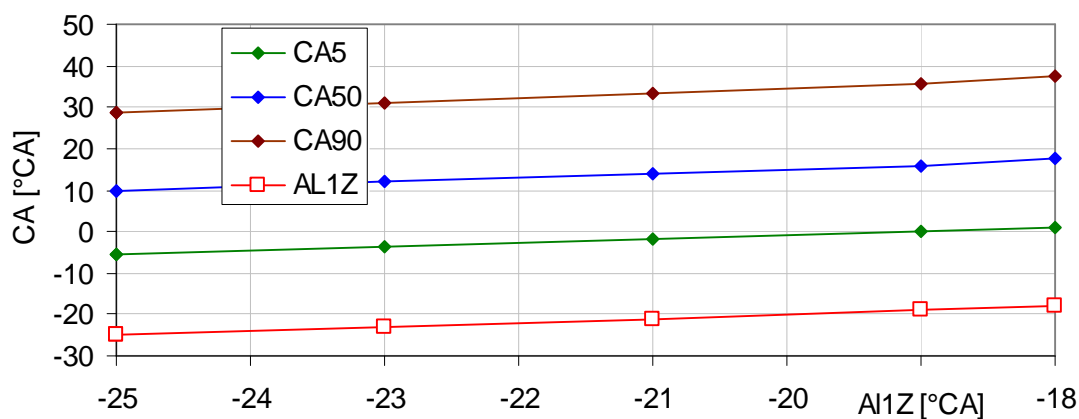
Navýšení měrné emise CO<sub>2</sub> o podíl mCO<sub>2</sub>a ve skutečnosti nezhoršuje celkovou emisi skleníkových plynů do atmosféry, neboť oxid uhličitý obsažený v bioplynu odchází do okolí při jakémkoli způsobu využití bioplynu (z komína čističky bioplynu, z výfuku kogenerační jednotky, spalující vyrobený bioplyn).

Reálné zhoršení emise CO<sub>2</sub> je tedy dáno pouze zvýšením podílu oxidu uhličitého z oxidace metanu (sklonem křivky průběhu mCO<sub>2</sub>g v Obr. 9). To je dáno zhoršováním

účinnosti motoru s rostoucím obsahem oxidu uhličitého v palivu (viz průběh křivky bshc v Obr. 5).

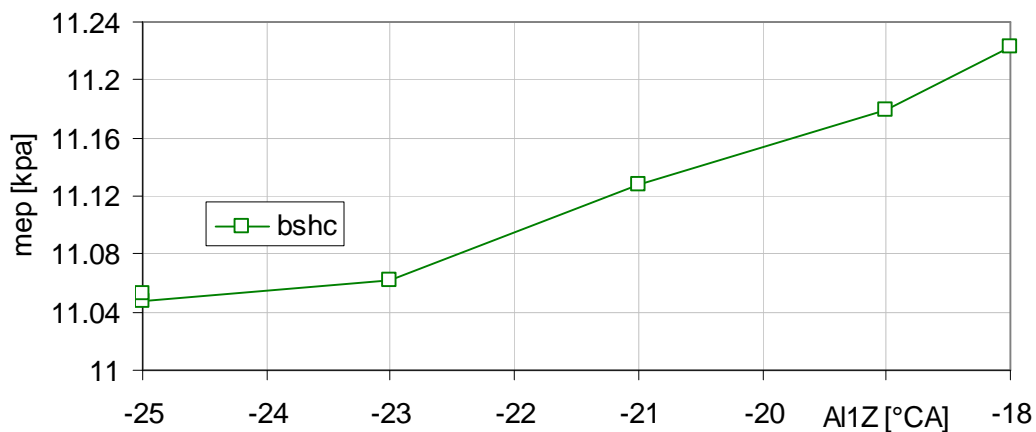
S ohledem na předpokládaný vývoj legislativní báze pro schvalování motorových vozidel nutno ovšem předpokládat jisté problémy s formálním splněním limitu emise CO<sub>2</sub>, až bude takový limit zaveden a pokud bude vozidlo, používající částečně čištěný bioplyn podle příslušného předpisu schvalováno.

## 6. Možnosti kompenzace dopadů přítomnosti CO<sub>2</sub> v palivu



Obr. 10 Vliv časování zážehu na fázování hoření

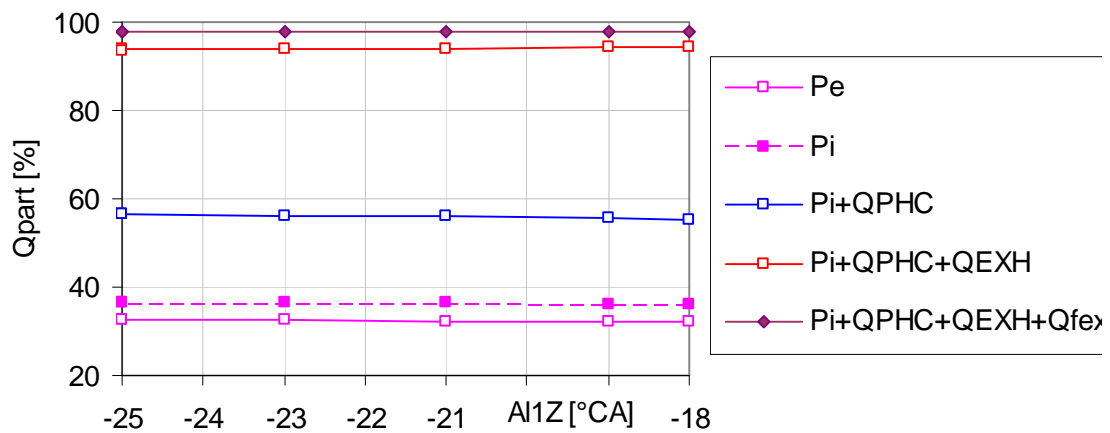
V jistých mezích je možno pomalejší hoření připravené směsi kompenzovat zvětšením předstihu zážehu. V Obr. 10 se vykresluje průběh fázování hoření v závislosti na okamžiku zážehu při provozu motoru na palivo obsahující cca 30 % (obj.) oxidu uhličitého. Křivky jsou takřka rovnoběžné. Při požadavku na polohu 50 %-ního bodu v energetickém optimu (10° po HU – viz komentář k Obr. 4) musí se předstih zážehu zvětšit natolik, že zhoršuje stupeň plnosti indikátorového diagramu na konci komprese (spalování začne příliš brzy) a přitom stále dlouhá etapa pomalého dohořívání zhoršuje stupeň plnosti v počáteční fázi expansního zdvihu (spalování skončí příliš pozdě).



Obr. 11 Optimalizace předstihu zážehu pro 30 % (obj.) CO<sub>2</sub> v palivu

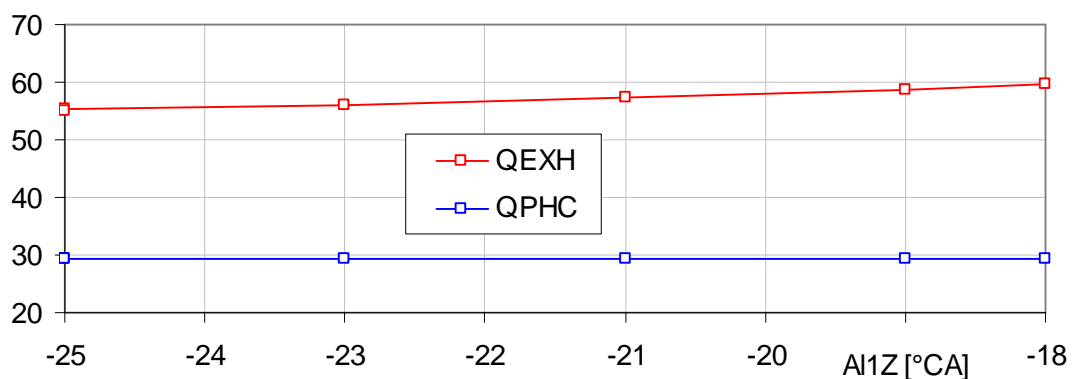
Výsledek snahy o optimalizaci fázování hoření (Obr. 11) je neuspokojivý. Vyjádřeno číselně: zvýšením obsahu CO<sub>2</sub> v palivu z 0 na 30 % (obj.) se zvýší měrná spotřeba tepla z hodnoty 10.5 na 11.2 MJ/kWh. Posunem 50 %-ního bodu do optimální pozice se měrná spotřeba tepla sníží na cca 11.05 MJ/kWh. I při poměrně značném požadavku na změnu časování zážehu (případně obtížně realizovatelné) je výsledný efekt nedostatečný.

Dalším potenciálním problémem při (nadměrném) zvyšování předstihu zážehu je zvýšení odvodu tepla do motorového chladiwa. Tento fenomén lze teoreticky doložit prostředky termodynamické analýzy pracovního oběhu. Byl pozorován experimentálně např. při pokusech o využití vysoké odolnosti metanu proti klepání ke zlepšení účinnosti motoru s nízkým stupněm komprese (např. převzatým z benzinového motoru) zvýšením předstihu zážehu. V extrémním případě se ukázalo dimenzování chladicího systému motoru jako nedostatečné a motor se za provozu trvale přehříval.



Obr. 12 Tepelná bilance

Situaci lze posoudit z průběhu dílčích součtů relativních (v %) složek tepelné bilance motoru v závislosti na předstihu zážehu (Obr. 12). Změna podílů jednotlivých energetických toků je takřka neznatelná.



Obr. 13 Odvod tepla výfukem a chlazením

I při zvýšení rozlišovací schopnosti vykreslením samotných absolutních (v kW) komponent tepelné bilance je vidět, že změna odvodu tepla chlazením při změně předstihu zážehu je (na rozdíl od množství tepla odvedeného výfukem) zcela

nevýznamná. V předmětném rozsahu regulačních intervencí tedy nebezpečí přehřívání motoru s vysokou pravděpodobností nehrozí. Toto (dílčí pozitivní) konstatování nijak neoslabuje odmítavé stanovisko k dodatečným zásahům do řídicího algoritmu, odvozené z posouzení potenciálu na vylepšení celkové účinnosti.

Úvahy, uvedené v paragrafech 4 až 6 jsou odvozeny z poznatků, získaných z experimentů na motorech s řízeným katalytickým systémem ( $\lambda = 1$ ) a dílčí konstatování a závěry jsou použitelné pro motory s touto koncepcí. Řízený katalytický systém je implementován prakticky na všech komerčně dostupných osobních a lehkých dodávkových automobilech a na části užitkových vozidel střední a větší velikosti. Jedná se tedy o koncepci, která s největší pravděpodobností bude kandidátem na implementaci provozu na částečně čištěný bioplyn a to (už s ohledem na minimalizaci možných rizik) v provedení s atmosférickým plněním, případně s mírným stupněm přeplňování. Z obecného pohledu jsou ovšem možné i jiné alternativy.

## 7. Plynový zážehový motor s chudou koncepcí

Tato koncepce se zakládá na skutečnosti, že motor spalující extrémně chudou homogenní směs vykazuje současně nízký obsah oxidu uhelnatého a oxidů dusíku v surových spalinách. Výchozí ambice je tedy dosažení akceptovatelné úrovně emisí bez dodatečné úpravy spalin, nebo s jednoduchým oxidačním katalyzátorem. S postupným zpřísněním emisní legislativy se ovšem možnost naplnění takových ambicí zhoršuje.

Navíc se nepotvrzují optimistické předpoklady o možnosti zlepšení účinnosti oproti řízenému katalytickému systému. Zpomalení hoření extrémně chudé směsi zhoršuje chemickou účinnost i stupeň plnosti indikátorového diagramu.

Extrémně chudá směs má malou výhřevnost, takže chudá koncepce je použitelná pouze na přeplňovaných motorech, kde se tato okolnost může kompenzovat zvýšením plnicího tlaku.

Energetické a emisní chování zážehového motoru s chudou koncepcí je silně závislé na partikulárním uspořádání spalovacího systému, zejména velikosti a tvaru spalovacího prostoru, způsobu a intenzitě pohybu jeho náplně a umístění jiskřiště zapalovací svíčky.

Velký počet stupňů volnosti vykazuje i konfigurace příslušenství motoru, zejména plnicí skupiny a způsobu a provedení řízení plnicího tlaku a způsobu a provedení odměřování paliva a jeho řízení.

Nelze tedy jednoznačně identifikovat možné dopady použití paliva s nezanedbatelným obsahem oxidu uhličitého. Nicméně, zcela obecně lze konstatovat, že přítomnost  $\text{CO}_2$  v palivu bude zhoršovat energetické parametry motoru při současně příznivém snížení tvorby  $\text{NO}_x$ , která zase vytvoří manévrovací prostor pro případné zlepšení energetických parametrů.

Některé simulační výsledky naznačují dokonce možnost zlepšení parametrů motoru úmyslným přídavkem oxidu uhličitého k palivu a to případně i ve větším množství, než jak odpovídá obsahu CO<sub>2</sub> v surovém bioplynu. Tato okolnost otevírá úvahu o možném použití CO<sub>2</sub>, separovaného z bioplynu při jeho čištění pro použití jako vozidlového paliva jeho zavedením do plnicího traktu stacionárního plynového motoru, pokud se takový v blízkosti bioplynové stanice vyskytuje (což je častý případ). Nutno ovšem akcentovat, že zlepšení parametrů nenastane automaticky, nýbrž jako výsledek pečlivé optimalizace energetických a emisních vlastností motoru.



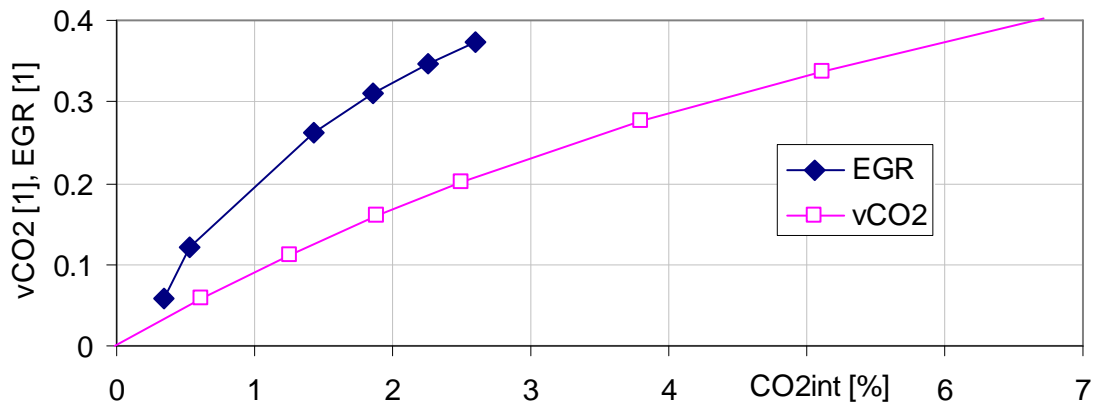
## 8. Plynový vznětový motor

Pojmem plynový vznětový motor se rozumí koncepce, která pro zapalování připravené homogenní chudé směsi plynného paliva se vzduchem používá energii, vzniklou spálením malého množství vstříknutého kapalného paliva (typicky nafty). Vznícení zapalovací dávky kapalného paliva nastane díky vhodným stavovým podmínkám (zejména vysoké teplotě) na konci kompresního zdvihu (tzv. vznícení kompresním teplem).

Pro zajištění bezpečného vznícení malé zapalovací dávky musí mít stupeň komprese motoru hodnotu, obvyklou pro vznětové motory. Aby se zamezilo (nežádoucímu) klepání motoru musí být připravená homogenní směs extrémně chudá. Zlepšení kvality zapalovacího procesu oproti zážehovému motoru s chudou koncepcí je deklarováno jako prostředek, umožňující kvalitní a rychlé prohoření i extrémně chudé směsi, takže některá (pravděpodobně většina) reálných provedení plynového vznětového motoru pracují s kvalitativní regulací výkonu. To znamená, že při požadavku na snížení aktuálního výkonu oproti nominálním se pouze snižuje přípust plynů a směs se ochuzuje bez cíleného ovlivňování jejího průtoku škrticí klapkou v sání.

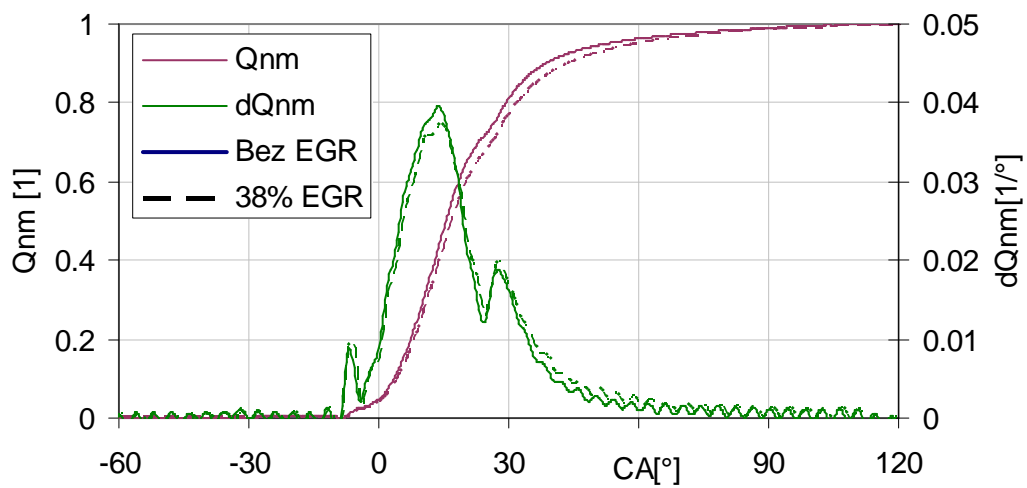
Minimalizace závislosti kvality spalování na složení připravené směsi vytváří dobré předpoklady k efektivnímu zpracování paliva s vysokým obsahem nehořlavé složky. Při jinak stejných podmínkách (tedy při stejné příпустi paliva) povede zvýšení obsahu  $\text{CO}_2$  pouze ke snížení aktuálního výkonu. Není nutno očekávat fatální odchylky v průběhu hoření a totální zhroucení spalovacího procesu je velmi nepravděpodobné (prakticky vyloučené).

Uvedené úvahy se opírají zejména o poznatky z edukační literatury, týkající se konstrukce a vlastností plynového vznětového motoru, nikoli ovšem provozovaného na palivo s vysokým obsahem oxidu uhličitého.



Obr. 14 Obsah CO<sub>2</sub> v plnicím potrubí

Otázkou je ovlivnění vznícení zapalovací dávky v prostředí se zvýšeným obsahem CO<sub>2</sub>. K tomu lze výchozí odhad odvodit ze zkušeností s provozem čistě vznětového motoru s přívodem recirkulujících spalin.



Obr. 15 Vliv recirkulace spalin na průběh vývinu tepla

Nezávisle proměnnou v grafu na Obr. 14 je naměřený obsah oxidu uhličitého v plnicím potrubí, který je takřka identický s molárním zlomkem oxidu uhličitého v náplni válce před zahájením spalovacího procesu. Na svislé ose se vykresluje

- Molární zlomek oxidu uhličitého v jeho směsi s metanem u plynového zážehového motoru při  $\lambda = 1$ .
- Hmotnostní podíl recirkulujících spalin u vznětového motoru.

Obsah  $\text{CO}_2$  v náplni válce vznětového motoru při nejvyšší vyšetřované přípustí recirkulujících spalin (cca 38 %) odpovídá obsahu  $\text{CO}_2$  v připravené směsi u plynového zážehového motoru, spalujícího palivo s objemovým podílem  $\text{CO}_2$  přibližně 22 % (při  $\lambda = 1$ , při spalování chudé směsi by byl ekvivalentní podíl oxidu uhličitého v palivu větší). Lze tedy provést (hrubý výchozí) odhad vlivu přítomnosti  $\text{CO}_2$  v náplni válce z vyhodnocení indikátorového diagramu vznětového motoru s masivní recirkulací spalin.

U vznětového motoru s moderním vstřikovacím systémem Common-Rail s dělením vstřikované dávky na 3 dílčí dávky (a s třemi vrcholy na diferenciálním průběhu vývinu tepla) je ovlivnění průběhu hoření přítomností oxidu uhličitého v náplni válce před vstřikem paliva zanedbatelné (Obr. 15).

Lze tedy předpokládat, že plynový vznětový motor je dobrým kandidátem na pokus o implementaci provozu na částečně čištěný bioplyn. Dosažení výhodných, nebo alespoň akceptovatelných parametrů ovšem vyžaduje provedení kvalifikované optimalizace s využitím sofistikovaných nástrojů. Nedoporučuje se tedy implementace strategie pokus – omyl v polních podmínkách.

## **9. Možnosti testování motoru při provozu na částečně čištěný bioplyn**

Je zřejmé, že nejlepším způsobem experimentálního stanovení vlastností motoru při provozu na částečně čištěný bioplyn je instalace funkčního vzorku na motorové brzdové stanoviště v laboratoři spalovacích motorů, osazení kompletní sadou snímačů (včetně možnosti snímání úhlově indexovaného průběhu tlaku ve válci) a jeho proměření v dostatečném rozsahu režimů. V laboratoři vybavené přívodem paliva s vysokým obsahem metanu (např. transitního zemního plynu s 98 % (obj.) CH<sub>4</sub>) a vhodným zařízením pro nezávislé odměření přípustně CO<sub>2</sub> do sání motoru, nebo (lépe) pro jeho přimíchávání do základního paliva je možno takový experimentální průzkum provést bez nutnosti dodávky připravené palivové směsi do laboratoře v mobilním zásobníku (tedy vcelku efektivním postupem).

Tímto způsobem lze zjistit exaktně všechny relevantní údaje s nejvyšší vypovídací schopností a v poměrně krátké době, patrně ovšem také s největšími náklady.

Obdobné výhody a nevýhody nabízí i testování celého vozidla na vozidlovém válcovém dynamometru laboratorní kvality. Tady bude nutno se smířit s poněkud omezenějším sortimentem měřených veličin a vozidlo bude zřejmě nutno přistavit ke zkouškám s natankovanou zásobou paliva požadovaného složení a v dostatečném množství.

Dalším zjednodušením a zlevněním, spojeným s restrikcí vypovídací schopnosti výsledků je provedení experimentu na vozidlovém válcovém dynamometru servisního typu, minimálně však vybaveného (alespoň servisním) analyzátozem spalin.

Při zkouškách vozidla je prakticky nezbytné (a při zkouškách motoru na motorovém brzdovém stanovišti účelné) zajištění přístupu k informačním sítím vozidla. Ideálním řešením je přístup do řídicí jednotky motoru (je-li použita) prostřednictvím rozhraní

ETK, nebo CAN. Pravděpodobně vyhovující je možnost připojení prostřednictvím diagnostické zásuvky (známe jako CARB-konektor, nebo VAG - 16-pinová zásuvka standardně instalovaná na vozidlech od roku výroby cca 1997) a pomocí vhodného HW a SW vybavení. Diagnostické vybavení kromě údajů o parametrech, jejichž hodnoty jsou dostupné pod příslušným komunikačním protokolem též zpřístupňuje paměť závad, která může obsahovat cenné doplňující informace.

Společnou výhodou všech popsaných provedení experimentů je možnost řízeného zatěžování měřeného objektu.

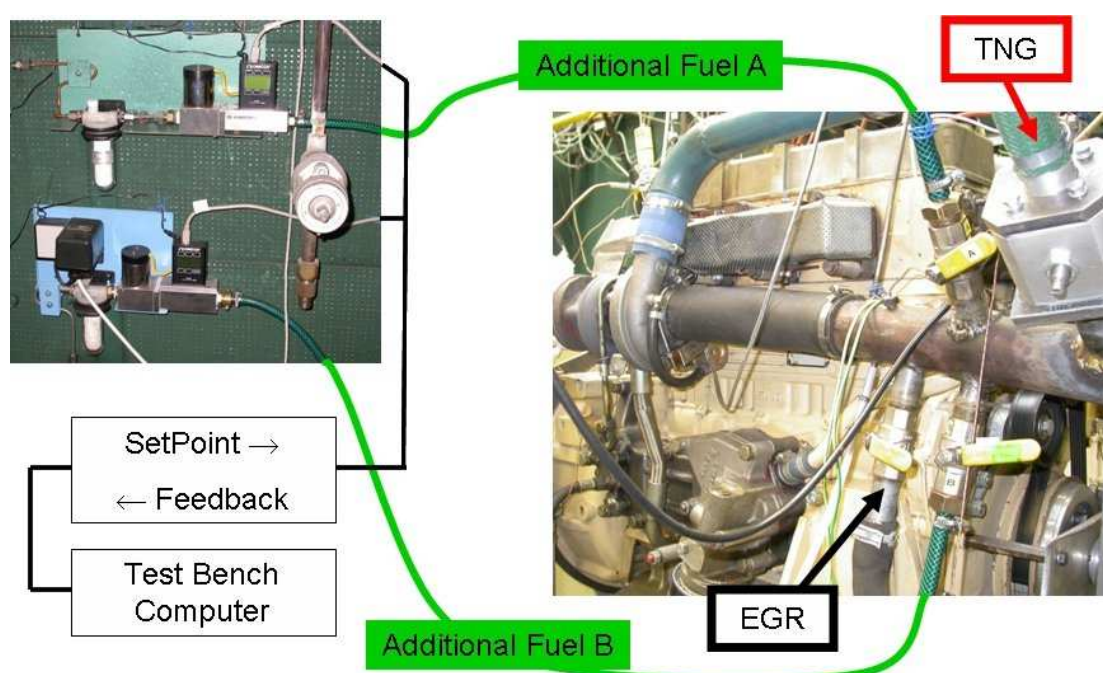
Jistý rozsah užitečných informací nabízí i testování vozidla v podmínkách napodobujících reálný provoz s použitím vhodného přístupu do informačních sítí a přenosného analyzátoru spalín. Servisní analyzátory jsou v konvenčním provedení konstruovány i na provedení měření v jedoucím vozidle (napájení z elektrické palubní sítě, zvýšená odolnost proti klimatickým podmínkám a vibracím). Nevhodným provedením pro tento účel jsou analyzátory s elektrochemickými články, které nemají vestavěné přímé měření obsahu CO<sub>2</sub> v analyzované směsi. Významným nedostatkem testování hnací jednotky v jedoucím vozidle je nemožnost exaktního nastavení režimu běhu motoru, neznalost skutečného zatížení a totální destrukce reprodukovatelnosti výsledku. Výsledky experimentu pak nutno chápat jako hrubý výchozí odhad.

Předmět zájmu experimentálního průzkumu závisí primárně na typu testovaného objektu.

U motoru s řízeným katalytickým systémem nutno zejména ověřit dostatečnost průtokového dimenzování palivové tratě. Příznakem korektní funkce je dodržení hodnoty součinitele přebytku vzduchu  $\lambda = 1$  s minimální tolerancí. Na tento účel jsou běžné servisní analyzátory dobře vybaveny, včetně provedení výpočtu, naprogramovaného ve vnitřním procesoru. Použitý výpočetní vztah (tzv. výpočet podle Brettschneidera) je málo citlivý na korektní zadání složení paliva a dává plausibilní výsledky v širokém rozsahu této okolnosti.

U motoru s chudou koncepcí je nutno porovnat složení spalin v příslušném provozním režimu se stavem při provozu na běžné palivo (zde se narazí na problém reprodukovatelnosti zkoušek) a případné odlišnosti nutno kvalifikovaně interpretovat. Alespoň subjektivně nutno vyhodnotit rovnoměrnost běhu motoru.

U plynového vznětového motoru lze postupovat obdobně. Nevyžaduje se však takový důraz na posouzení rovnoměrnost běhu jako u zážehového motoru s chudou koncepcí.



Značná část nejistot asociovaných se zkouškami v jedoucím vozidle lze eliminovat využitím portabilního systému pro indikaci tlaku ve válci. Při použití indikační svíčky (tedy zapalovací svíčky s integrovaným snímačem rychle proměnlivého tlaku) a proudových kleští pro snímání vhodných úhlově rovnoměrných impulsů (bývá součástí sensorického systému soudobých motorů, kde se využívá pro řízení časované dodávky paliva do motoru, a/nebo zapalování) je instalace měřící aparatury do vozidla jednoduchá a všechny funkčnosti jsou zachovány. Příslušné měřící kanály a elektronický systém pro pořízení a následné vyhodnocení záznamu patří k nákladnějším komponentám experimentálního vybavení, je však patrně

možno krátkodobé měření zajistit dodavatelským způsobem u profesionální zkušebny. Poměr cena / kvalita výstupů by pak mohl být akceptovatelný.

Za racionální přístup při nedostatku prostředků lze považovat.

**Použití vozidla:**

- dedikovaného prvovýrobce pro provoz na zemní plyn
- schváleného pro provoz na zemní plyn stupně L. (tedy prošlého úspěšně schvalovací zkouškou při provozu na palivo, obsahujícího 15 % (obj.) dusíku. To vytváří předpoklady k dostatečnému dimenzování palivové tratě.
- vybaveného diagnostickou zásuvkou, jejíž lokalizace ve vozidle je známá a jejíž komunikační protokol je čitelný diagnostickým zařízením, které je k dispozici, anebo je možno jej opatřit
- se kterým už byly akvirovány dostatečné zkušenosti při provozu na zemní plyn běžné kvality.
- Dvoupalivové provedení je vhodné alespoň pro fázi úvodního sběru informací. Umožní:
  - nouzové dojetí při vzniku jakéhokoli problému s plynovou palivovou soustavou
  - ošetření procesu spouštění motoru a následného náběhu zpětnovazebního řízení složení směsi

**Vybavení měřicí technikou v sestavě:**



Komunikátor s **diagnostickým rozhraním** vozidla. Propojovací kabel s vestavěným konvertorem fyzikální vrstvy komunikačního kanálu je běžně na trhu včetně příslušného SW vybavení v ceně v řádu jednotek Kč. Umožňuje periodické vyčítání celé řady užitečných informací, které jsou k dispozici v elektronickém řídicím systému motoru / vozidla s frekvencí zlomků až málo jednotek Hz. Navíc umožňuje vyčtení paměti závad a v jisté situaci i vymazání závad, které jsou deklarovány jako sporadické. Samozřejmě

další komponentou měřicího kanálu je (přenosný) počítač, do jehož vstupního portu (typicky USB) je připojen výstup z diagnostického nástroje a na jehož pevném disku je instalován příslušný SW. Výhodné je též použití adaptéru pro napájení přenosného počítače z palubní sítě vozidla. Doporučuje se trvalé umístění této komponenty měřicí výbavy ve vozidle po celou dobu testování a aktivace periodického záznamu při každém běhu motoru. Výhodou poměrně nízké vzorkovací frekvence je nepřehnaná velikost výstupních souborů, která nevytváří žádné problémy s jejich uložením na pevném disku počítače a při jakékoli další manipulaci při následném vyhodnocení.



**Analyzátor spalin** s implementací principu absorpce infračerveného záření pro zjišťování molárních zlomku CO, CO<sub>2</sub> a uhlovodíků, vestavěným elektrochemickým článkem pro zjišťování molárního zlomku O<sub>2</sub> a procesorem s implementovaným on-line výpočtem hodnoty součinitele přebytku vzduchu. Analyzátoři takového uspořádání (tzv. servisní) jsou na trhu v ceně v řádu (málo) stovek Kč, použité přístroje je možno opatřit (např. z různých internetových nabídek) v cenách až o celý řád nižších. Servis je běžně dostupný i pro přístroje „předchozí generace“. Analyzátoři jsou vybaveny komunikačním rozhraním. Firmware a jako příslušenství dodávaný SW jsou typicky jednoúčelově přizpůsobeny pro využití ve stanicích měření emisí, nicméně samotný obsah hlášení bývá dobře čitelný a sestavení vlastního programového vybavení pro periodické vyčítání údajů o složení spalin je (pro schopného programátora) bez velkých problémů možné. Doporučuje se použití analýzy spalin ve všech situacích, kdy lze očekávat změnu chování motoru oproti předchozímu stavu. Trvalé použití s aktivovaným průběžným záznamem není nutné, může být ovšem přínosné.





**Indikační aparatura** dedikovaná pro snímání a záznam rychle proměnlivého tlaku ve válci motoru v jedoucím vozidle. Úplná profesionální aparatura pro tento účel, včetně všech potřebných čidel a SW vybavení zajišťujícího uživatelský komfort při parametrizaci a měření je na trhu v cenách v řádu (hodně) stovek kKč až jednotek MKč. Portabilní indikační aparaturu lze sestavit i z vhodných komponent za cenu do 200 kKč, vyžaduje se ovšem kvalifikovaný přístup a jisté pensum zkušeností s automatizovaným sběrem dat pro vytvoření optimální sestavy, její parametrizaci a vybavení vlastním SW. Nasazení takové aparatury je vhodné v situacích, kdy se narazí na problém, jehož popis je nedostupný s použitím výbavy, vyjmenované v předchozích odstavcích. Doporučuje se objednání měření a následné vyhodnocení u profesionální laboratoře. Řada z nich je na výjezdní měření vybavena a má jej zařazeno v seznamu nabídek komerčních aktivit. I tak je nutno počítat s cenou jednodenního výkonu v okolí 100 kKč.

*Prozkoumání chování vozidla / motoru v režimech:*

- běh naprázdno při jmenovitých otáčkách běhu naprázdno
- běh naprázdno při (několika různých) zvýšených otáčkách
- volná akcelerace motoru při několika různých polohách pedálu akcelérátoru
- jízda vozidla při (několika různých) ustálených rychlostech
- jízda vozidla s akcelerací při několika různých polohách pedálu akcelérátoru

Pokud v uvedených režimech

- nejsou subjektivně pozorovány nepravidelnosti běhu motoru,
- údaje na diagnostickém rozhraní leží v předpokládaných mezích,
- neplní se paměť závad
- údaj součinitele přebytku vzduchu na příslušné zobrazovací jednotce analyzátoru spalín je trvale blízký hodnotě 1 (až na krátkodobé odchylky při prudkých změnách režimu běhu)

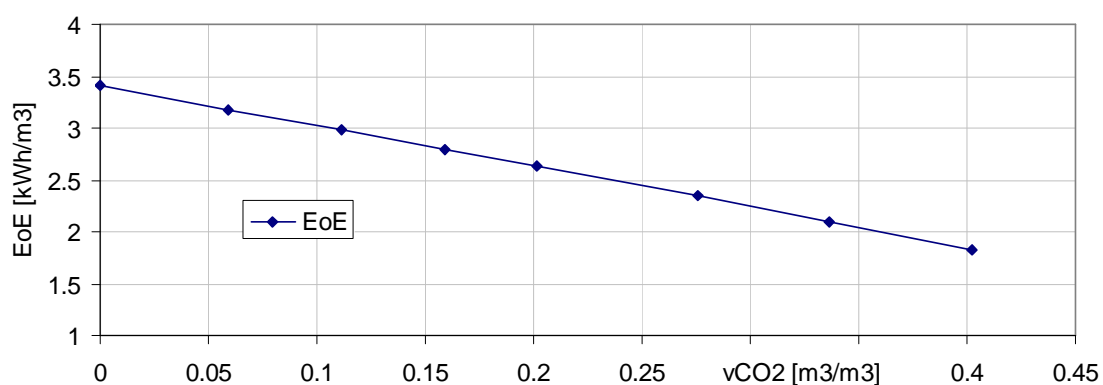
Ize schopnost motoru zvládat provoz na příslušné palivo považovat za prokázanou. Vozidlo lze nasadit do zamýšleného provozu.

Doporučuje se i nadále alespoň příležitostně monitorovat chování hnací jednotky s použitím diagnostického vybavení podle nahoře uvedené specifikace.

Dalším doporučením je provedení testu vozidla v autorizované laboratoři podle příslušného předpisu [2]. Takový test pro případ použití paliva s vlastnostmi mimo nominální rozsah není žádným závazným normativem vyžadován (v tomto směru je stávající emisní legislativa neúplná). Provedení testu s využitím špičkové experimentální výbavy autorizované laboratoře však umožní odhalit případná další úskalí provozu vozidla na částečně čištěný bioplyn, nebo (v lepším případě) potvrdí, že žádné dodatečné problémy nenastávají. Navíc tak dojde k přesunu obsahu poznatkové báze z kategorie předběžných nezávazných odhadů do kategorie ověřených výsledků. Provedení takového testu není extrémně nákladné, protože se jedná o standardní, autorizovanou zkušebnou opakovaně nabízený a prováděný úkon.

## 10. Shrnutí

Úvahy a dílčí závěry, uvedené v předchozích paragrafech jsou potvrzeny experimentálními poznatky z velkého množství laboratorních měření a simulacemi, provedenými s využitím kalibrovaných simulačních nástrojů.



Obr. 16 Využitelná energie uskladněného paliva

Jako nejschůdnější varianta pro implementaci paliva s vysokým obsahem oxidu uhličitého se jeví vozidlo vybavené motorem **s atmosférickým plněním**, s řízeným katalytickým systémem, dedikované prvovýrobce pro provoz na chudý zemní plyn.

Automatické přizpůsobení palivové aparatury motoru na provoz na palivo se zhoršenou kvalitou nastane se slušnou pravděpodobností (nikoli jistotou). Navíc lze toto automatické přizpůsobení relativně snadno ověřit. Modifikace dalších seřizovacích prvků se nedoporučuje. Požadovaná regulační intervence je poměrně velká a její výsledek je i tak nedostatečný.

Nejvýznamnějším negativním dopadem na vlastnosti vozidla je **snížení dojezdu** pro danou velikost zásobníku paliva. Dojezd se zhoršuje jako důsledek snížení výhřevnosti  $\text{nm}^3$  paliva a současného zhoršení účinnosti motoru. Tato okolnost se numericky vyjadřuje vyčíslením použitelné energie na setrvačniku motoru na

jednotku množství uskladněného paliva (Obr. 16). Je to tedy součin objemové výhřevnosti paliva a účinnosti motoru.

**Předpokládaný podíl CO<sub>2</sub> v palivu na úrovni max. 25 % se jeví jako rozumný limit.**

## **11. Reference**

1 - Zemní plyn – Výpočet spalného tepla, výhřevnosti, hustoty, relativní hustoty a Wobbeho čísla ČSN EN ISO 6976

2 - COMMISSION REGULATION (EC) No 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information

## **12. Přílohy (elektronicky)**

V přílohách jsou uvedeny protokoly z měření, která byla podkladem pro sestavení této souborné studie.

Přílohy jsou vzhledem k rozsahu několika set stran přiloženy na CD.