Výfukové škodliviny konstrukčně neupraveného motoru na bioetanolové palivo E-85

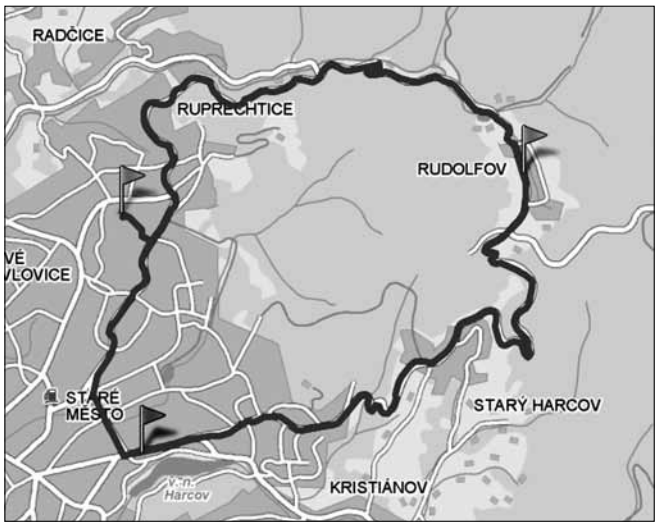
ON-ROAD EXHAUST EMISSIONS FROM AN ORDINARY GASOLINE ENGINE OPERATING ON E-85

Michal Vojtíšek, Martin Mazač, Josef Laurin – Technická univerzita v Liberci

Jednou z možností využití bioetanolu pro pohon zážehových motorů je palivo označované E-85, což je směs 50–85 % obj. bioetanolu s automobilovým benzinem a přísadami. Bioetanol se získává lihovým kvašením zemědělských plodin (1) a světová produkce bioetanolu pro pohon motorů neustále roste (2). Výchozími surovinami k výrobě bioetanolu jsou v Evropě nejčastěji obilí, cukrová řepa, brambory a kukuřice, v místech se subtropickým a tropickým podnebím cukrová třtina.

Významnější parametry bioetanolu, benzinu a paliva E-85 obsahujícího 85 % obj. bioetanolu uvádí tab. I. V porovnání s benzinem má bioetanol nízkou výhřevnost, vysoké výparné teplo a vysokou odolnost proti klepání, tzn. vysoké oktanové číslo. Bioetanol obsahuje 34,8 % hm. kyslíku.

Obr 1:. Zkušební trasa (www.mapy.cz)



Kvůli nízké výhřevnosti je hmotnostní měrná spotřeba bioetanolu, uváděná zpravidla v $g.kWh^{-1}$, vyšší než spotřeba benzinu.

Výparné teplo bioetanolu je v porovnání s benzinem vysoké a působí problémy při spouštění motoru za nízkých teplot. Pro spouštění za nízkých teplot je vhodné použít pomocné zařízení, případně spouštět motor na benzin.

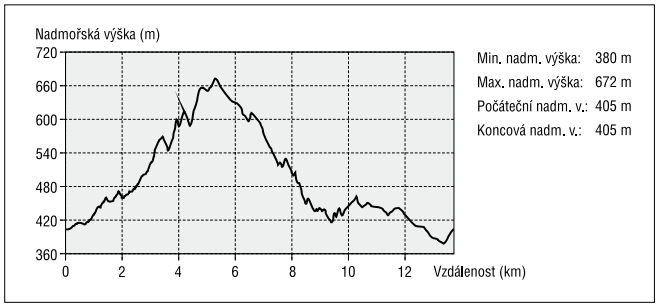
Vysoká odolnost proti klepání umožňuje použití bioetanolu pro zážehové motory s vyšším kompresním poměrem, než je obvyklé u benzinových motorů. Kompresní poměr motoru spalujícího bioetanol je možné zvýšit až na 15 : 1.

Problémy vyvolá i malé množství vody v bioetanolovém palivu, které může být příčinou rozpadu směsi bioetanolu s benzinem na dvě fáze, přičemž bioetanol přechází do vodní fáze. Bioetanol může způsobit korozi některých součástí palivového příslušenství motoru, i když tuto nepříznivou vlastnost lze zmírnit přidáním inhibitorů koroze. Agresivně působí na některé plasty a pryže.

Palivo E-85 je vhodné pro motory vozidel označovaných FFV (Flexible Fuel Vehicles), umožňující provoz jak na benzin, tak na směsi benzinu s bioetanolem, přičemž podíl bioetanolu ve směsi může být 0 až 85 %. Motor může mít původní nebo mírně vyšší kompresní poměr, avšak vyhovující i pro benzin. Palivový systém je dimenzován pro provoz na bioetanolové palivo a přizpůsoben agresivnímu působení bioetanolu na některé součástky. Pro vyšší spotřebu bioetanolu oproti spotřebě benzinu je nutná úprava palivového příslušenství, tj. vstřikovacího zařízení tak, aby umožňovalo zhruba 1,5× vyšší hmotnostní dodávku paliva. Podle koncentrace kyslíku ve výfukových plynech získává řídicí jednotka motoru vozidla FFV informaci o složení paliva (obsahu bioetanolu) a tomu přizpůsobí seřizovací parametry, tj. dávkování paliva, předstih zážehu aj.

Nejvíce vozidel s motory na palivo E-85 je provozováno v Brazílii, v Evropě pak ve Švédsku. Použití paliva E-85 nachází stále širší uplatnění např. v USA, o čemž svědčí růst počtu

Obr. 2. Výškový profil zkušební trasy



Tab. I. Vlastnosti benzinu BA 95, bioetanolu a E-85

	Jednotka	BA 95	Bioetanol	E-85
Hustota (15 °C)	$kg.m^{-3}$	~750	794	~787,4
Výhřevnost (25 °C)	$MJ.kg^{-1}$	~42,8	26,8	~29,08
Výparné teplo	$kJ.kg^{-1}$	~290	904	816,27
Obsah kyslíku	% hm.	<2,7	34,8	<29,9
Oktanové číslo VM		95	108	~106
Tlak par (40 °C)	kPa	45–90	21	35–60

veřejných čerpacích stanic s tímto palivem ze 120 v roce 2005 na 2 450 v roce 2011.

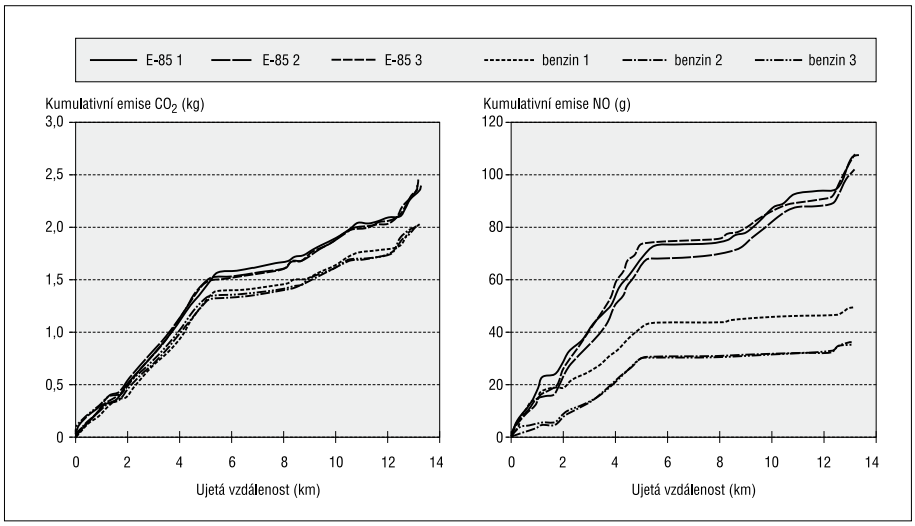
Škodlivé výfukové emise motorů FFV

Přechodem z provozu motoru na benzin na provoz s palivem E-85 dochází ke změně provozních parametrů motoru, a to hlavně emisních, jak ukazují výsledky experimentálních prací, např. (3–6).

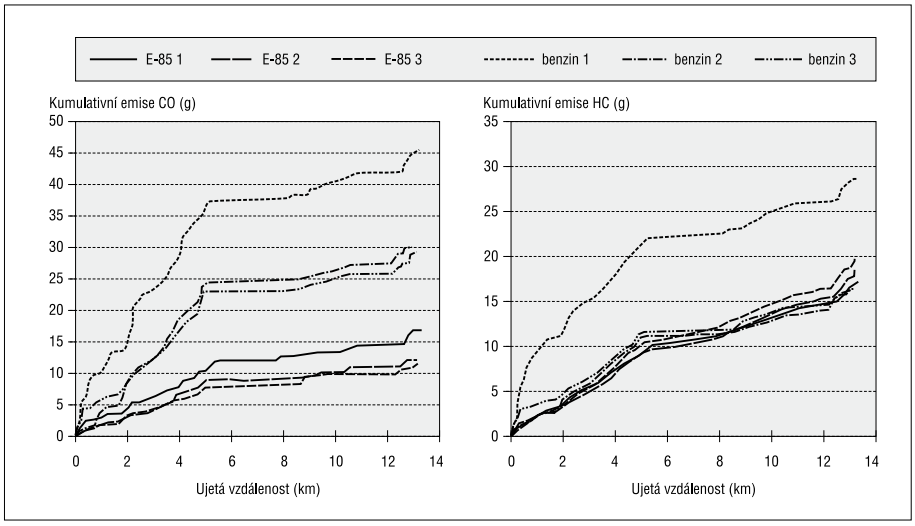
Výsledky rozsáhlého výzkumu výfukových emisí řady osobních automobilů FFV provedli autoři (3). Vliv paliva na plynné výfukové škodliviny byl zjišťován při emisním testu FTP-75, při kterém je automobil zatěžován po dobu 1874 s na válcovém dynamometru a ujede 17,77 km. Průměrné hodnoty změny emisí po přechodu z benzinu na E-85 ukazuje tab II. Hodnoty emisí zjištěné při provozu na E-85 jsou vyjádřeny v procentech hodnot naměřených při provozu motoru na benzin, které jsou považovány za 100 %. Tabulka uvádí též změnu emise PM podle (4).

Výsledky testů ukázaly, že u motorů FFV dochází při provozu na E-85 v porovnání s provozem těchto vozidel na benzin ke snížení produkce plynných výfukových škodlivin v průměru: CO (oxid uhelnatý) o 20 %, THC (plynné organické látky) o 8 %, NO_x (oxidy dusíku) o 18 % a PM (částice) o 34 %.

Obr. 3. Kumulativní emise oxidu uhličitého (vlevo) a oxidů dusíku (vpravo) v závislosti na ujeté vzdálenosti



Obr. 4. Kumulativní emise oxidu uhelnatého (vlevo) a plynných organigkých látek (vpravo) v závislosti na ujeté vzdálenosti



Provoz bežných, konstrukčně neupravených motorů na E-85

V České republice bývá palivo E-85 využíváno i u některých starších automobilů s motory určenými pouze k provozu na benzin. U motorů s elektronickým vstřikováním paliva je spoléháno na to, že elektronická řídící jednotka se pomocí lambda regulace (zpětné vazby řízení dávky paliva čidlem koncentrace zbytkového kyslíku ve výfukovém potrubí) na alternativní palivo přizpůsobí navýšením dávky vstřikovaného paliva. Tuto schopnost má do určité míry prakticky každý moderní zážehový motor, proto např. v USA je provoz běžných motorů na benzin s 10% etanolu bezproblémový. Navýšení dávky je však možné obvykle maximálně o několik desítek procent, poté je již zpravidla vyhodnoceno jako chyba. Motor pak pracuje s menším množstvím paliva, tj. s chudou směsí. U vozidel vybavených třícestnými katalyzátory, jejichž účinnost je podmíněna relativně přesným dodržením stechiometrického poměru palivo-vzduch, i malé odchylky, které se neprojeví na kultivovanosti chodu motoru, zpravidla vedou k výraznému navýšení emisí.

Vliv náhrady benzinu palivem E-85 na výfukové emise takového motoru ukazují výsledky experimentu provedeného na Technické univerzitě v Liberci.

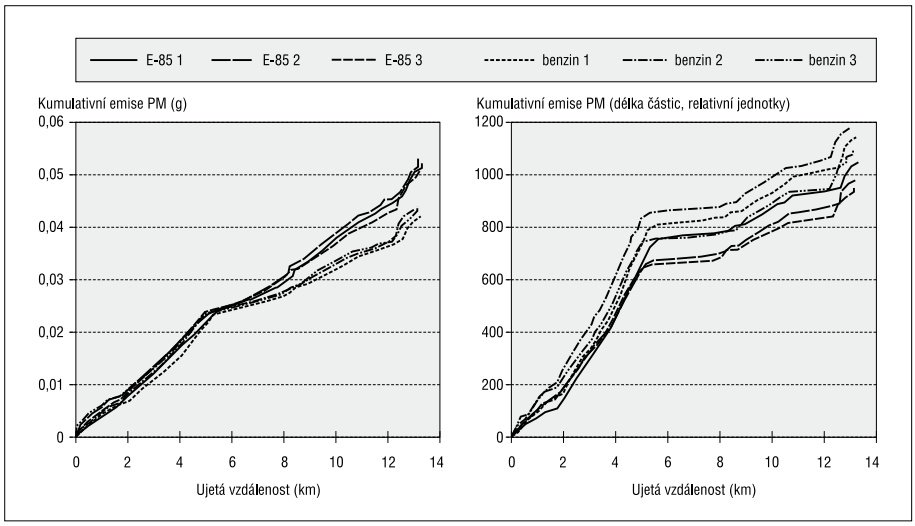
Tab. II. Změny výfukových emisí po přechodu z benzinu na E-85

Palivo	CO (%)	THC (%)	NO_x (%)	PM (%)
Benzin	100	100	100	100
E-85	80	92	82	66

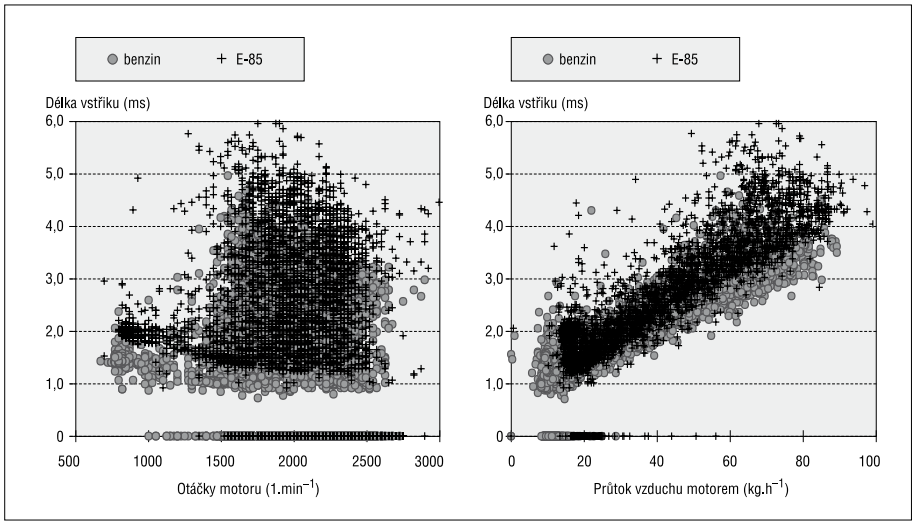
Škodlivé výfukové emise motoru nepřizpůsobeného pro palivo E-85

Vliv přechodu z benzinu na palivo E-85 byl vyšetřován u staršího osobního automobilu Škoda Felicia kombi, rok výroby 1996, se zážehovým motorem o zdvihovém objemu 1,29 dm^3 a maximálním výkonu 50 kW s elektronicky řízeným

Obr. 5. Kumulativní emise celkové hmotnosti částic (vlevo) a celkové délky částic (vpravo) v závislosti na ujeté vzdálenosti



Obr. 6. Délka vstřiku dle řídící jednotky motoru v závislosti na otáčkách motoru (vlevo) a průtoku vzduchu (vpravo)



jednobodovým vstřikováním paliva. Vozidlo bylo vybaveno třísložkovým katalyzátorem a pětistupňovou mechanickou převodovkou. Vozidlo mělo najeto 130 tis. km.

Během měření bylo vozidlo provozováno na předem stanovené trase (obr. 1.), která obsahovala městský provoz a provoz v hornatém terénu, typický pro oblast Liberce. Výškový profil trasy je na obr. 2. Hmotnost vozidla při zkouškách byla 965 kg, vozidlo bylo obsazeno pouze řidičem a měřicí aparaturou.

Vozidlo bylo provozováno na běžný automobilový benzin a na palivo E-85 (Tereos TTD, Dobrovice), obsahující přibližně 85 % ethanolu, benzin a různé přísady. Zkušební trasa byla projeta třikrát pro každé palivo.

Složení výfukových plynů bylo měřeno přenosnou aparaturou, umístěnou na palubě měřeného vozidla, která je popsána v (7). Koncentrace HC, CO a CO_2 byly měřeny infračerveným spektrometrem, koncentrace NO_x elektrochemickým článkem a hmotnostní koncentrace PM rozptylem laserového paprsku. Pro orientační posouzení velikosti PM a orientační indikaci míry dopadu na lidské zdraví byla dále měřena délková koncentrace PM (vyjádřená jako celková délka částic v daném objemu výfukových plynů) experimentální ionizační komorou (8). Průtok výfukových plynů byl stanoven na základě kombinace výpočtu a kvalifikovaných odhadů z dat průběžně vyčítaných z elektronické řídicí jednotky motoru (7). Poloha a rychlost vozidla byly měřeny polohovacím zařízením GPS s rychlou odezvou. Naměřené koncentrace byly časově synchronizovány s daty z elektronické řídicí jednotky a z polohovacího zařízení a násobeny vypočteným průtokem výfukových plynů, čímž byly získány okamžité hmotnostní toky emisí.

Výsledky a diskuse

Vzhledem k výrazné dynamice provozu i hodnot emisí a neopakovatelnosti místních podmínek a reakcí řidiče v reálném provozu by byly průběhy okamžitých hmotnostních toků emisí, vynesené v časové ose, obtížně porovnatelné. Výsledky jsou proto představeny jako kumulované hmotnostní emise v závislosti na kumulované vzdálenosti od počátku trasy. Obr. 3. ukazuje hodnoty pro CO_2 a NO_x, obr. 4. pro HC a CO, obr. 5. pro celkovou hmotnost a délku PM. Vyneseny jsou hodnoty ze všech tří průjezdů trasy na každé palivo, přičemž první průjezd je považován za „přípravný“ (preconditioning). Vyjma výrazně vyšších emisí HC, CO a NO_x během prvního průjezdu trasy na benzin a vyšších emisí CO během prvního průjezdu trasy na E-85, jsou výsledky z jednotlivých průjezdů srovnatelné, celkové sumy za trasu se liší o řádově jednotky procent, což je opakovatelnost srovnatelná s měřením v laboratoři. Vyšší hodnoty během první jízdy jsou přičítány vlivu provozní historie motoru, zejména ochlazení katalyzátoru během přípravy na zkušební jízdy. Z výsledků je patrné, že byly výrazně vyšší (trojnásobné) emise NOx, výrazně nižší (o 60 %) emise CO, mírně vyšší emise CO_2, mírně vyšší emise PM měřených dle celkové hmotnosti a mírně nižší emise PM měřených dle celkové délky.

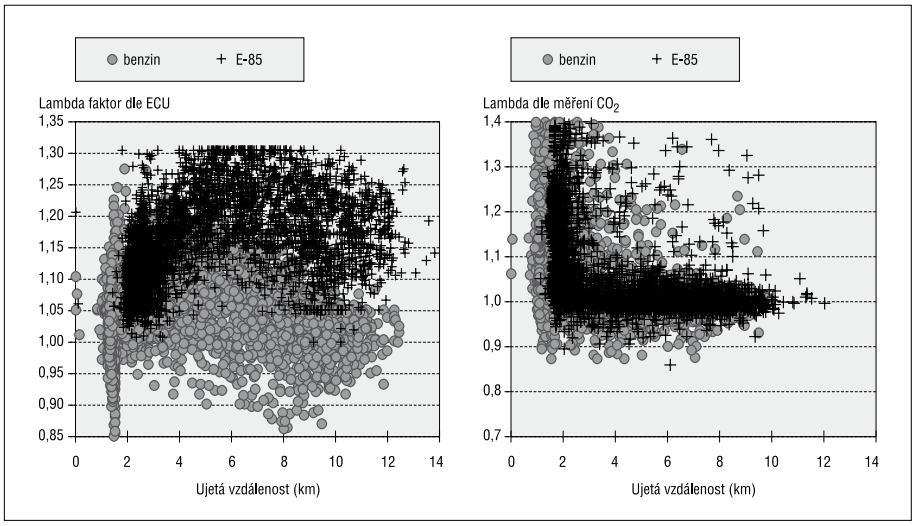
Délky impulsu pro otevření vstřikovače jsou pro obě paliva vynesené v závislosti na otáčkách motoru a v závislosti na průtoku nasávaného vzduchu na obr. 6., jsou delší pro E-85, což nasvědčuje tomu, že řídicí jednotka navýšila množství vstřikovaného paliva ve snaze dosáhnout stechiometrické směsi. To odpovídá i navýšení součinitele přebytku vzduchu „lambda“ indikovaného řídicí jednotkou, který je vynesen na levém grafu v obr. 7. Při provozu na E-85 byly hodnoty výrazně vyšší než 1 a lze předpokládat, že při některých režimech by teoretické hodnoty byly vyšší než limitní hodnota řídicí jednotky (cca 1,25). Dle součinitele přebytku vzduchu „lambda“ vypočteného

z měřeného složení výfukových plynů na pravém grafu v obr. 7. byl ale motor provozován na stechiometrickou směs téměř vždy. To dokládají i průběhy „lambda“ získané z měřeného složení výfukových plynů, vynesené pro obě paliva na obr. 8. Teploty výfukových plynů na konci výfukového potrubí (výsledky nejsou zobrazeny) byly téměř shodné pro všechny průjezdy trasou a srovnatelné pro obě paliva.

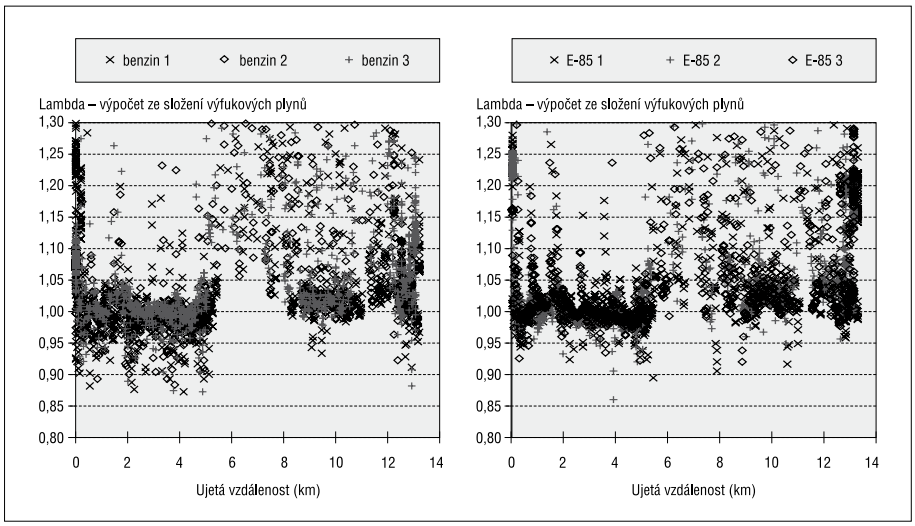
Lze proto usoudit, že se motor na palivo E-85 poměrně rychle (desítky minut) přizpůsobil a adaptivně navýšil dávkování paliva tak, že v případech, kdy je motor provozován na stechiometrickou směs, bylo stechiometrické směsi palivo-vzduch zpravidla dosaženo pro obě paliva.

Dosažení stejného „lambda“ při provozu na alternativní palivo jako při provozu na benzin však není zárukou dosažení „optimálního“ složení výfukových plynů pro třísložkový katalyzátor, a tím ani dosažení nízkých emisí. Z obr. 3. je zřejmé, že při provozu na E-85 byly emise NO_x během některých úseků oproti provozu na benzin výrazně vyšší, přičemž z obr. 8. nejsou patrné výrazné rozdíly „lambda“. Z hodnot emisí při provozu na benzin lze usoudit, že katalyzátor nebyl ani v perfektním stavu, ani zcela nefunkční, což není pro dané stáří a kilometráž vozidla atypické. Lze se proto domnívat, že vyšší emise NO_x jsou z velké části způsobeny relativním nedostatkem produktů neúplného spalování paliva (HC a CO) v částečně fungujícím katalyzátoru. Je možné, že u vozidla s nefunkčním katalyzátorem by došlo k nižšímu navýšení NO_x; u vozidla s perfektně fungujícím katalyzátorem výsledek nelze předvídat. NO_x lze přitom považovat za jedinou „zajímavou“ regulovanou složku, které pravděpodobně bude nutné věnovat pozornost: emise HC a CO z vozidel zpravidla nejsou problematické a emise částic (3–4 $mg.km^{-1}$) byly nižší než současné i připravované (Euro 6: 5 $mg.km^{-1}$) limity pro osobní automobily. Emise neregulovaných složek a neregulované aspekty, například relativní míra toxicity výfukových plynů, nebyly v této předběžné studii sledovány.

Obr. 7. Lambda (podíl skutečného ku stechiometrickému množství nasávaného vzduchu) v závislosti na průtoku nasávaného vzduchu: hodnota dle řídicí jednotky (vlevo) a hodnoty vypočtené z měřených koncentrací výfukových plynů (vpravo)



Obr. 8. Lambda (podíl skutečného ku stechiometrickému množství nasávaného vzduchu) vypočtená z měřených koncentrací výfukových plynů při provozu na benzin (vlevo) a E-85 (vpravo)



Závěr

Jednou z možností uplatnění bioetanolu pro pohon zážehových motorů je palivo E-85 určené zejména pro motory „Flexible Fuel Vehicles“. Přechodem z benzinu na E-85 dochází u motorů FFV ke snížení produkce výfukových škodlivin CO, HC, NO_x i PM.

Na TUL byl proveden experiment s použitím paliva E-85 u staršího osobního automobilu Škoda Felicia kombi s motorem o zdvihovém objemu 1,29 dm^3 a jmenovitém výkonu 50 kW nepřizpůsobeným pro provoz na bioetanolové palivo:

- Výfukové emise byly měřeny během jízdy po trase v hornaté městské či příměstské oblasti přenosným měřicím zařízením umístěným na palubě vozidla. Celkové sumy emisí se při opakovaných průjezdech (vyjma „zahřívacího“ kola) se stejným palivem lišily řádově o jednotky procent.
- Řídicí systém motoru se adaptoval na alternativní palivo prodloužením délky vstřiku paliva; součinitel přebytku vzduchu „lambda“, vypočtený z měřeného složení výfukových plynů, byl srovnatelný pro obě paliva.
- Při provozu na E-85 byly, oproti provozu na benzin, o 60 % nižší emise CO a třikrát vyšší emise NO_x, zatímco emise HC byly srovnatelné. Celková hmotnost emitovaných částic byla mírně vyšší a celková délka částic mírně nižší.
- Jiné vlivy paliva E-85, jiná vozidla a jiné podmínky než zde popsané nebyly v této studii sledovány.

– Z výsledků vyplývá, že využitím E-85 ve stávajícím vozovém parku, tj. i ve vozidlech na toto palivo nekonstruovaných, může být přínosné se dále zabývat.

Měření byla provedena z osobního zájmu na vlastní náklady autory Martinem Mazačem (zapůjčení a provoz vozidla, palivo) a Michalem Vojtíškem (zapůjčení měřicí aparatury). Zpracování dat do publikovatelné formy bylo provedeno v rámci projektu MEDETOX (Innovative Methods of Monitoring of Diesel Engine Exhaust Toxicity in Real Urban Traffic), financovaného Evropskou komisí v programu LIFE+ (LIFE10 ENV/CZ/651) a Ministerstvem životního prostředí ČR.

Souhrn

Jednou z možností uplatnění bioetanolu pro pohon zážehových motorů je palivo E-85 určené zejména pro motory „Flexible Fuel Vehicles“. E-85 je však díky příznivé ceně využíván i v běžných, konstrukčně neupravených motorech. V této studii byl běžný osobní automobil Škoda Felicia vybavený motorem s elektronickým vstřikováním paliva a třícestným katalyzátorem provozován na příměstské hornaté trase na E-85 a na benzin. Emise oxidu uhelnatého (CO), uhlovodíků (HC), oxidů dusíku (NO_x) a pevných částic (PM) byly měřeny za běžného provozu přenosným měřicím zařízením umístěným na palubě vozidla, další údaje byly vyčítány z palubní diagnostiky. Výsledky poukazují na velmi dobrou adaptaci elektronické řídící jednotky, díky které byl motor provozován na přibližně stechiometrickou směs palivo-vzduch na obě paliva. Při provozu na E-85 byly oproti provozu na benzin zjištěny o 60 % nižší emise CO, přibližně třikrát vyšší emise NO_x, zatímco emise HC byly srovnatelné. Celková hmotnost emitovaných částic byla mírně vyšší a celková délka částic mírně nižší.

Klíčová slova: bioetanol, E-85, výfukové emise, PEMS, zážehový motor, adaptace motoru, emise částic, délka emitovaných částic, alternativní paliva.

Literatura

1. Hromádko, J. et al.: Výroba bioetanolu. *Listy cukrov. řepař.*, 126, 2010 (7/8), s. 267–271.
2. Číž, K.: Bioetanol – světový rozvoj jeho využití jako motorového paliva. *Listy cukrov. řepař.*, 126, 2010 (1), s. 31–32.
3. Yanowitz, J.; McCormick, R. L.: Effect of E-85 on Tailpipe Emissions from Light-Duty Vehicles. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 59, 2009, s. 172–182.
4. Graham, L. A.; Belisle, S. L.; Baas, C.: Emissions from light duty gasoline vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E-85. *Atmospheric Environment*, 42, 2008, (19), s. 4498–4516.
5. Miler, P. et al.: Zhodnocení ekologického potenciálu paliva E-85. *Listy cukrov. řepař.*, 125, 2009 (5/6), s. 180–184.
6. *Emissions from Flexible Fuel Vehicles with different etanol blends.* AVL MTC AB. REPORT No. AVL MTC 5509. 2005/10.
7. Vojtíšek-Lom, M. et al.: *Off-cycle, real-world emissions of modern light-duty diesel vehicles.* Society of Automotive Engineers Technical Paper Series, 2009, dokument 2009-24-0148. 22 s.
8. Vojtíšek-Lom, M.: Total Diesel Exhaust Particulate Length Measurements Using a Modified Household Smoke Alarm Ionization Chamber. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 61, 2011, s. 126–134.

Vojtíšek M., Mazač M., Laurin J.: On-road Exhaust Emissions from an Ordinary Gasoline Engine Operating on E-85

Bioethanol, in the form of E-85 (fuel containing 85 % of ethanol mixed with 15 % of gasoline and various additives), is typically used in “Flexible Fuel Vehicles”. In the Czech Republic, due to its favorable price, it is also used, as E-85 or mixed with gasoline, in ordinary engines without any modifications or adjustments. In this study, an older Škoda Felicia car with fuel-injected spark ignition engine with a three-way catalyst was operated alternately on gasoline and on E-85 on a hilly urban and rural route. Exhaust emissions of carbon monoxide (CO), hydrocarbons (HC), nitrogen oxides (NO_x) and total particulate matter (PM) mass and length were measured with a portable, on-board monitoring system. Multiple runs were made on each fuel to verify test-to-test repeatability. The engine control unit has remarkably well adapted to E-85 by increasing the fuel injector pulse width, so that the engine operated mostly at stoichiometric ratio on both gasoline and E-85. Operation on E-85 has resulted, compared to gasoline, in about 60 % lower emissions of CO, three times higher emissions of NO_x, comparable emissions of HC, slightly higher particulate mass, and slightly lower total particle length.

Key words: bioethanol, E-85, exhaust emissions, PEMS, spark ignition engine, engine adaptation, particulate emissions, particle length, alternative fuels.

Kontaktní adresa – Contact address:

Michal Vojtíšek, M.Sc., Ph.D., Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů, Studentská 2, 461 17 Liberec, Česká republika, e-mail: michal.vojtisek@tul.cz