Výkonové parametry zážehového motoru při spalování paliva E85

PERFORMANCE INDICATORS OF THE IC ENGINE FUELED BY E85

Jiří Čupera, Adam Polcar – Mendelova univerzita v Brně

Direktivní snižování emisní zátěže životního prostředí vede výrobce vozidel k nutnosti nacházet technická opatření pro splnění legislativně stanovených limitů. Směry pozornosti vývoje spalovacích motorů se upírají k technickým zařízením, která redukují množství polutantů na základě rozličných principů. V současné době se jedná o principy selektivní katalýzy či případně o redukci pevných částic ve spalinách částicovými filtry. Jinou možností je však užití paliva, které již svým chemickým složením, značně eliminuje možnost výskytu limitovaných polutantů, nebo dokonce podílem uhlíku a vodíku, jako nositeli energetického potenciálu, omezuje produkci skleníkového plynu CO_2. Tato paliva mohou být fáze plynné i kapalné a již v současnosti existuje celá řada konstrukčních způsobů, jak vhodně konvertovat konvenční pohonné jednotky na různá paliva, a to dokonce i v jiném skupenství. Kapaliny mají oproti plynným palivům určitou výhodu ve skladování a energetickém obsahu je jednotkovém množství paliva. Diverzifikace látek vhodných ke spalování v pístových spalovacích motorech vedla k určité definici paliv, která jsou vyráběna z biomasy. Tato paliva jsou všeobecně nazývána biopalivy. Zdrojem, tedy biomasou, se dále zamýšlí biodegradabilní podíl produktů, odpadů a zbytků ze zemědělské výroby, ať rostlinného nebo živočišného charakteru. Definice je dále rozšířena o podíly také z dřevařského průmyslu, ale i o podíly z průmyslových či komunálních odpadů pod podmínkou, že jsou biodegradabilní. Jedním z významných zdrojů surovin pro výrobu biopaliva je i cukrová řepa. Z kvasného průmyslu je známý produkt, který je používán nejen v potravinářské či chemickém průmyslu, ale je možné a dokonce i výhodné z hlediska ekologického a za určitých podmínek i ekonomického jej spalovat v tepelných motorech. Tento produkt je etanol. Vzhledem k výše zmíněné definice je označen prefixem bio tak, aby byl znám jeho původ. Bioetanol je palivem velmi rozšířeným a jeho počátky v oblasti spalování u pístových motorů začalo na konci 19. století ve Francii a Německu. V letech krizí petrochemického průmyslu vždy s úspěchem suploval tehdejší konvenční paliva. Současné motivy však mají mnohem větší díl ekologického aspektu, než tomu bylo v případě ropných krizí. Vždy bude existovat polemika v rovině politické a ekonomické, budou kladeny otázky o globálních dopadech na schopnosti lidstva zajistit sobě samému dostatečně bohatý potravinový fond. Nicméně predikce dalšího vývoje není námětem tohoto článku. Vědecké práce na téma spalování bioetanolu jsou soustředěny zejména na produkci limitovaných polutantů u obou druhů spalovacích motorů, zážehových i vznětových. Autoři publikovaných článků (1, 2) provedli experimentální měření na vznětovém motoru traktoru Zetor. Směsné palivo tvořila motorová nafta s přídavkem bioetanolu a na základě analýzy pak byla určena percentuální hranice „vhodného“ poměru s důrazem na konečném složení spalin. V dalším výzkumu pak bylo navázáno i měřením paliva E95 v laboratořích pro homologační měření (2). Avšak primárně je palivo určeno spíše do segmentu zážehových spalovacích motorů. V následujícím textu bude popsáno experimentální měření parametrů vozidla, které spaluje palivo E85 (volumetrický podíl ethanolu činí 85 %) již déle než 1 rok. Předchozí rok provozu byl monitorován z hlediska metodologického tak, aby nedocházelo ve výsledné analýze k defektům z důvodu nutných předchozích oprav či úprav systému. Měření bylo provedeno za účel objektivního srovnání „neexperimetálního“ vzorku spalovacího motoru bez výrazných konstrukčních změn, potažmo také bez finančně náročných konverzních systémů. Tento aspekt je veřejností velmi pozorně vnímán. Cena přestavby může dosahovat částky až 15 tis. Kč (4). Z pohledu vývojových aktivit je

Obr. 1. Vozidlo spalující E85 na válcovém dynamometru

Tab. I. Základní vlastnosti benzínu a ethanolu (3)

	Benzín	Ethanol	Jednotka
Složení			
Vodík	0,15	0,13	(1)
Uhlík	0,85	0,52	(1)
Kyslík	0	0,35	(1)
Vlastnost			
Hustota	750	795	($kg.m^{-3}$)
Výhřevnost	43,9	28,6	($MJ.kg^{-1}$)
Oktanové číslo	95 (98,100)	111	(1) RON
Teoretická potřeba vzduchu	14,7	9	($kg.kg^{-1}$)
Výparné teplo	400	900	($kJ.kg^{-1}$)
Rozsah zápalnosti l	0,4 až 1,4	0,3 až 2,1	(1)

Tab. II. Specifikace motoru zkoušeného vozidla

Parametr	Velikost	Jednotka
Zdvihový objem	1 598	(cm^3)
Maximální výkon	77	(kW při 5 700 min^{-1})
Maximální točivý moment	148	(Nm při 4 500 min^{-1})
Vrtání	76,5	(mm)
Zdvih	86,9	(mm)
Kompresní poměr	11,5	(1)
Počet ujetých km	107 927	(km)

zřejmé, že důsledná optimalizace na ropná paliva trvající století nemůže být vždy aplikována na paliva s odlišnými vlastnostmi. Tab. I. dává přehled charakteristických parametrů paliv pro zážehové motory – benzin a ethanol. Je patrné, že hodnoty jsou velmi odlišné a způsobují i jiné zpětné zásahy do systémů, např. vnější tvorby směsi.

Materiál a metody

Měření bylo realizováno ve vozidlových laboratořích Ústavu techniky a automobilové dopravy na Mendelově univerzitě v Brně. Osobní automobil, který byl pro účely ověření výkonových parametrů vybrán, byl z produkce společnosti Volkswagen, konkrétně Golf čtvrté modelové řady. Stručná charakteristika motoru vozidla je uvedena v tab. II. Jelikož je stechiometrický poměr u ethanolu, resp. paliva E85 velmi odlišný (9 : 1 oproti 14,6 : 1 u benzinu), je nutná podmínka pro správný průběh spalování upravit množství vstřikovaného paliva E85 tak, aby ve výsledku byl vstřikovací ventil otevřen po delší dobu. V této fázi je nutné ověřit průtokové vlastnosti ventilu z důvodu splnění časových požadavků sekvenčního vstřikování. U zmíněného vozidla, byl systém vybaven dodatečným kontrolérem, jehož interní algoritmus byl vybaven multiplikativním regulačním faktorem a docházelo pouze ke zvětšení doby otevření ventilu, přičemž ostatní regulační algoritmy byly realizovány původním řídicím systémem společnosti Magneti Marelli. Aktivace přídavného regulátoru je provedeno spínačem umístěným u přístrojové desky obdobně jako u známých systémů pro zkapalněný ropný plyn. Umístění vozidla na válcovém dynamometru je patrné z obr. 1.

Tab. III. Vlastnosti válcového dynamometru

Parametr, jednotka	Veličina
Max. zkušební rychlost ($km.h^{-1}$)	200
Max. výkon na nápravu (kW)	240
Průměr válců (m)	1,2
Setrvačná hmotnost válců (každá náprava) (kg)	1 130
Min. rozvor (mm)	2 000
Max. rozvor (mm)	3 500
Rozsah měření rychlosti ($km.h^{-1}$)	0–200
Rozsah měření sil (kN)	4× ±5
Přesnost měření rychlosti ($km.h^{-1}$)	±0,01
Přesnost měření sil (%)	±0,25
Přesnost regulace rychlosti (%)	±0,1
Přesnost regulace síly (%)	±0,5

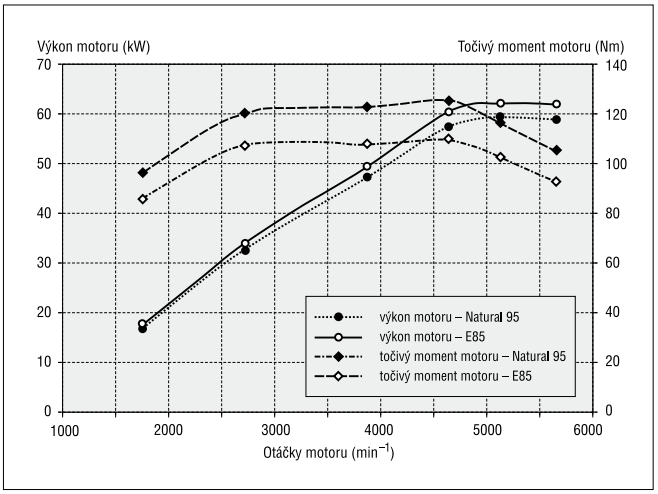
Měření výkonových parametrů bylo realizováno na laboratorním válcovém dynamometru. Přenos výkonu z motoru je realizován přes trakci a hnací kola na válce zkušebny, přičemž výpočtem je pouze jednoduchý součin hodnot síly a obvodové rychlosti. Zkušebna vyniká přesností regulátorů a výsledky jsou ekvivalentní měření na motorovém stanovišti. Specifikace dynamometru je uvedena v tab. III.

Měření spotřeby paliva bylo provedeno zapojení dvojice hmotnostních (Coriolisových) průtokoměrů, které svým principem činnosti nevnášejí do dopravní cesty paliva zvýšené vřazení odpory a zejména jsou dnes nejpřesněji realizovatelným systémem měření průtoku. Přesnost měření u použitých průtokoměrů z produkce Siemens činí typicky 0,1 % z měřené hodnoty. Testy motoru vozidla proběhly při spalování obou paliv – Natural 95 a biopalivo E85. Výkon motoru je z hlediska principu válcových dynamometrů dán součtem výkonu na kolech, ztrátovým výkonem v trakci a případně ztrátovým výkonem daným prokluzem. Metody měření proběhly jak dynamicky, tak i staticky, přičemž stěžení pro analýzu je hodnocení statické. Opakování bylo provedeno třemi následnými zkouškami a u žádného ze sledovaných parametrů nepřekročil variační koeficient velikost 2 %. Zkoušení bylo nastaveno způsobem, aby byl simulován skutečný pohyb vozidla na vozovce. Charakteristiky byly měřeny v rozsahu otáček 1 600 min^{-1} až 5 700 min^{-1}. Proti vozidlu byly přistaveny ventilátory s příkonem 11 kW a rychlostí proudění vzdušniny 80 $km.h^{-1}$. Teplota v laboratoři byla systémem ventilace udržována na 20 °C a výsledky měření byly korigovány dle metodiky ISO 1585.

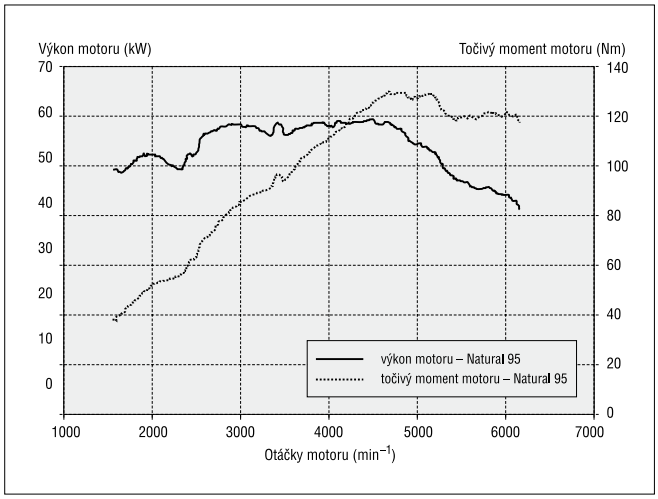
Výsledky a diskuse

Experimentální měření bylo určeno k porovnání parametrů motoru při spalování konvenčního paliva (Natural 95) a biopaliva (E85). Analýzou výsledků měření výkonových parametrů motoru bylo zjištěno, že průběhy křivek zanesených v grafu na obr. 2. je v rozporu s ryzí fyzikální teorií i mnoha provedenými testy. Obecně lze u vozidel očekávat pokles výkonu až do výše 20–30 % (5). Tento pokles jest dán nižší výhřevností paliva. Reálně je pokles menší, neboť přepočtením kalorického

Obr. 2. Výsledky statické zkoušky měření výkonu motoru

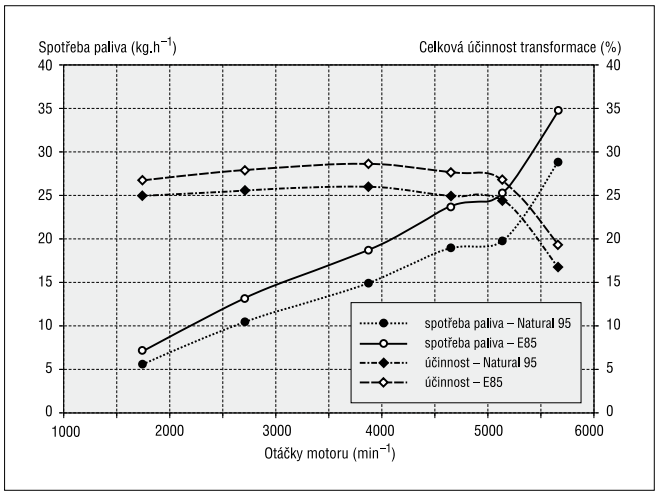


Obr. 3. Výsledky dynamické zkoušky měření výkonu motoru



obsahu v jednotkovém objemu směsi paliva a vzduchu jsou si téměř rovny. V případě našeho měření však naopak došlo ke zvýšení výkonu motoru. Srovnáním údaje výrobce (tab. II.) s naměřenými výsledky zjistíme značnou disproporci v maximální hodnotě. Přisuzovat ji lze částečně opotřebením motoru, ale také způsobem provozu. Deklarované hodnoty výrobcem jsou vztaženy na ideální podmínky práce spalovacího motoru, kde značnou roli hraje teplota nasávaného vzduchu. U motorových stanovišť je tato teplota aktivně regulována na smluvní teplotu 25 °C. Motor instalovaný v prostoru vozidla, ale z tohoto prostoru spalovací vzduch nasává a bohužel dochází k negativnímu ovlivnění teplotou, která je částí konvekcí a částí radiací zvyšována teplem z motoru. Rozborem dat bylo zjištěno, že v oblasti maximálního výkonu se teplota v sacím potrubí pohybovala u obou paliv v rozmezí 58–62 °C. Tedy u obou paliv nutně docházelo ke snížení hmotnostního naplnění válců. Známým faktorem změny parametrů je taky způsob zasažení do regulačního procesu spalování. Aby tento jev nezkresloval výsledky, byl diagnostickým testerem s VAG protokolem proveden výčet chyb elektronické řídicí jednotky. Žádné chyby či anomálie z výstupu snímačů nebyly nalezeny. Přesto byla zkouška provedena i v dynamickém režimu, jejíž výsledky jsou uvedeny v grafu na obr. 3. Důvodem je skutečnost, že regulační systémy řízení procesu spalování jsou v dynamickém režimu v určité časové fluktuaci a mohou mít dopad na výsledné parametry. Ještě zajímavější pohled však skýtá průběh hodinové spotřeby paliva. Prostým srovnáním je patrné, že spotřeba paliva E85 je v maximální hodnotě vyšší o téměř 17 % a koresponduje s obecnými zkušenostmi z provozu. Přepočtením na jednotku MJ.kW^{-1}h^{-1}, která interpretuje potřebu energie vázanou v palivu na jednotku produkované energie, bylo zjištěno, že naopak energie směsi u benzinu s sebou nese o 16 % více. Prostou úvahou lze dojít k závěru, že účinnost cyklu v případě E85 je vyšší. Průběh přepočtené účinnosti transformace z chemické energie na mechanickou je patrný z grafu na obr. 4. V motorkářském pojetí je takové rčení téměř kacířské. Vysvětlení těchto výsledků s publikacemi jiných autorů leží ve zcela jiné rovině, než nabízí termochemická kinetika hoření. V případě experimentálních prací se často jedná o výzkum, který je určitým způsobem idealizován. Jinými slovy je regulační systém vždy pro statické body optimalizován. Výše uvedená konverze palivového systému byla provedena nejjednodušeji realizovatelným regulátorem – zvětšením

Obr. 4. Průběh hmotnostní hodinové spotřeby a celkové účinnosti motoru



doby otevření vstřikovacích ventilů. V takovém případě je nutné sledovat i průběh složení směsi, aby v případě maximálního zatížení motoru vždy ležela v oblasti pod stechiometrií, tedy pod hodnotou 1. V případě testovaného vozu se hodnota pohybovala v maximálním výkonu u benzinu na 0,9 u E85 pak na 0,94. Přiblížení k hodnotě 1, či možné zvětšení přes hodnotu 1, s sebou nese riziko nárůstu teploty a tím i možnost tepelně-mechanického poškození motoru. Tedy naopak při hodnotách výrazně pod stechiometrii (bohatá směs) dochází nedokonalou transformací uhlovodíku i internímu chlazení spalovacího prostoru. Palivo E85 má z tohoto pohledu značnou výhodu v téměř dvojnásobné hodnotě výparného tepla a tedy lepším ochlazením spalovacího prostoru při výměně náplně válce. Avšak i tento fakt nevede k uspokojivému řešení předchozího dilema. Autoři článku (Brian), prováděli obdobné měření, byť zaměřené na produkci emisí, u vozidla Saab, které bylo již z výroby tzv. FFV (Flexi Fuel Vehicle – vozidlo umožňující spalování benzinů i vysokopodílových směsí ethanolu). U tohoto vozu již výrobce deklaruje vyšší výkonové parametry na E85. Důvodem je změna regulace motoru. Avšak v realizovaném měření byl zobrazen graf výsledků měření na válcovém dynamometru, kde v časovém měřítku docházelo ke značné změně předstihu

zážehu u benzinového paliva. Rozdílově se pak jednalo až o 25° před horní úvratí. Takováto dramatická změna předstihu má výrazně negativní dopad na využití energie při hoření, neboť expanzní práce v cyklu není vhodným způsobem využita. Naopak je patrné, že u paliva E85 dochází k poklesu předstihu zážehu ve značně menší míře. Také je patrné, že regulační systém potřebuje poměrně dlouhou dobu k tomu, aby se adaptoval na nové podmínky. Tedy lze říci, že skutečnost vyššího oktanového čísla značně zvyšuje odolnosti proti detonačnímu hoření. Také podmínky testu (vysoká teplota nasávaného vzduchu navzdory stabilní okolní teplotě) rozvoj detonačního hoření podporuje. Vzaté předchozí vyjádření ukazují nikoliv na zvýšenou účinnost transformace u spalování E85, ale spíše na nižší účinnost při hoření benzinu.

Závěr

Pozornost experimentálního měření byla soustředěna na výkonové parametry motoru spalujícího palivo E85, přičemž byl důraz kladen na metodické provedení tak, jak může být vozidlo zatěžováno. Tedy bez ohledu na důsledné dodržování teploty zejména nasávaného vzduchu (ovšem teplota prostředí laboratoří byla udržována na hodnotě 20 °C). Měřením bylo zjištěno, že výkon na palivo E85 je vyšší než při spalování Naturalu 95. Důvody jsou nastíněny v diskusní části příspěvku. Optimalizace spalování E85 by však ve své podstatě nemělo zahrnovat pouze změnu v systému přípravy směsi, např. dodržením definovaného rozsahu směšovacího poměru. Ale vzhledem ve výši oktanového čísla by mělo dojít ke zvýšení kompresního poměru, který je základem pro růst termické účinnosti spalovacího motoru. To je u motoru s přirozeným sáním velmi těžko realizovatelné za předpokladu, že bude schopné spalovat i ropná paliva. U přeplňovaných motorů lze systém adaptovat změnou tlaku plnění a dávkou paliva, a také předstihu zážehu. Tímto způsobem je provedena regulace u výše zmíněného vozu Saab.

Příspěvek vznikl za podpory projektu TP 1/2011 „Monitorování výkonových parametrů traktorového motoru“ a projektu TP 3/2010 „Stanovení provozního zatížení motorů traktorů ve vazbě na mezinárodní projekt COST 356 „EST - Towards the definition of a measurable environmentally sustainable transport“.

Souhrn

Článek se zabývá výkonovými parametry spalovacího motoru osobního automobilu, které je schopen spalovat jak benzin, tak i palivo E85. Všechna experimentální měření byla provedena na válcovém dynamometru a byly sledovány následující parametry: otáčky motoru, točivý moment motoru, výkon, teplota nasávaného vzduchu a hmotnostní spotřeba paliva. Rozbor výsledků měření ukázal, že navzdory menší výhřevnosti paliva E85 je vozidlo schopno podávat vyšší výkon. Příčinu je možné hledat v adaptaci elektronického řídicího systému motoru. Velmi výhodný parametr – vysoké oktanové číslo – zabraňuje větší míře detonačního hoření. Autoři obdobných publikací taktéž upozorňují na fakt, že naproti teoretickým pracím, které vždy ukazují zhoršení výkonových parametrů motoru spalujícího E85, regulační systém značnou měrou ovlivňuje výsledek výkonu, a to často ve prospěch E85.

Klíčová slova: výkon motoru, palivo E85, bioetanol, dynamometr.

Literatura

1. Hromádko, J. et al.: Využití etanolu ve vznětových motorech. *Listy cukrov. řepař.*, 125, 2009 (1), s. 24–27.
2. Hromádko, J. et al.: Využití paliva E95 ve vznětových motorech. *Listy cukrov. řepař.*, 127, 2011 (2), s. 63–66.
3. Macek, J.: *Spalovací motory I.* Praha: ČVUT, 2007. 260 s.
4. Miler, P. et al.: Zhodnocení ekologického potenciálu paliva E85, *Listy cukrov. řepař.*, 125, 2009 (5/6), s. 180–184.
5. West, B. H. et al.: *Fuel Economy and Emissions of the Ethanol-Optimized Saab 9-5 Biopower.* SAE Technical Paper 2007-01-3994, 2007, 10 s.

Čupera J., Polcar A.: Performance Indicators of the IC Engine Fueled by E85

The article deals with the performance indicators of the combustion engine, which is able to burn gasoline and E85. All experimental measurements were performed on a chassis dynamometer and the following parameters were monitored: engine speed, torque, power, intake air temperature and fuel mass consumption. Analysis of results showed that despite the lower heating value of E85 fuel, the vehicle is capable of generating higher power. The cause may be found in adaptation of the electronic engine control system. Very useful parameter – high octane number – prevents greater degree of detonation combustion. The authors of articles on similar topic also refer to the fact that, contrary to theoretical works, which always show worse performance parameters of the engine burning E85, a regulation system largely influences the measurement of power or torque, often in favor of E85.

Key words: engine power, E85 fuel, bioethanol, dynamometer.

Kontaktní adresa – Contact address:

Ing. Jiří Čupera, Ph. D., Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, e-mail: xcupera@node.mendelu.cz