

ALTERNATIVNÍ ZPŮSOBY MĚŘENÍ SPOTŘEBY PALIVA S VYUŽITÍM DAT PALUBNÍ DIAGNOSTIKY

J. Čupera, M. Havlíček

Došlo: 11. dubna 2005

Abstract

ČUPERA, J., HAVLÍČEK, M.: *Alternative methods of fuel consumption metering based on the on-board diagnostics outputs*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2005, LIII, No. 4, pp. 23-32

The article describes alternative methods of fuel consumption measurement based on model with using the diagnostic outputs of engine control unit. On-board diagnosis (the second level, known as OBD-2) has been mandated by government regulation because of advanced damage control systems in newer cars. However, its signals can be used for accurate analyses of power or torque measurement. On-board diagnostics offers many various parameters such a spark advance, intake air temperature, coolant temperature, throttle position, air flow mass and so on. Many of them have been unavailable without using sophisticated and expensive instrumentation. In the article are described two ways of fuel consumption measuring which are based on intake air consumption and knowledge about air-fuel ratio. First of them is founded on voltage output of oxygen sensor, the second on short (long) term fuel trim. As is shown at the end the second way gives more accurately results.

fuel consumption, on-board diagnostics, oxygen sensor, fuel trim

Integrace systémů elektronicky řízených komponent ve vozidle si vyžádalo důslednou kontrolu jejich činnosti tak, aby byly splněny legislativní požadavky zejména z hlediska emisí a v případě chyby relevantní vzhledem ke zvýšení škodlivých složek spalín bylo toto oznámeno řidiči varovným indikátorem na přístrojové desce. Systém OBD (On-board diagnostics = palubní diagnostika) byl logickým vyústěním problémů spojených se značnou nekompatibilitou systémů řízení motoru a dnes i ostatními částmi vozidla. Stal se standardizovaným řešením pod doporučeními SAE (Society of Automotive Engineers) i normativy ISO pro splnění podmínek regulací plynoucích z předpisů.

Z předchozí charakteristiky lze palubní diagnostiku chápat jako vnitřní systém ochrany emisní čistoty vozidla v průběhu technického života automobilu, a to nejen na úrovni sledování provozního stavu aktivních komponent, které se podílí na přípravě procesu hoření

ve válci motoru, ale jsou snímány i parametry částí, které jsou pasivní, ale mají, byť sebestmenší, vliv na celkovou míru znečištění ovzduší. Nutno podotknout, že ačkoliv se pozornost věnuje primárně emisí škodlivin v exhalacích, stranou nezůstávají ani ostatní celky vozidla, kde existuje riziko znečištění, např. odparem z nádrže apod. (Balenović, 2004).

Technicky je systém palubní diagnostiky tvořen jako aplikační nástavba výstupů řídicích algoritmů příslušných kontrolérů či jednotek a pro potřeby diagnostiky jsou měřené, resp. vypočtené veličiny, případně chybová hlášení předávány na komunikační rozhraní. Z této definice plyne, že systém OBD-2 zprostředkovaně poskytuje parametry motoru, které mnohdy nelze jednoduchým způsobem měřit externě, a které lze dále využít ke zpřesnění analýzy výsledků měření. A právě na této znalosti je založen dále popsaný postup měření spotřeby paliva s využitím signálů palubní diagnostiky.

MATERIÁL A METODA

K ověření navrhovaného algoritmu výpočtu spotřeby paliva byl využit osobní automobil Škoda Octavia 2.0 se čtyřválcovým zážehovým motorem s plnou implementací OBD-2, resp. evropskou podobou

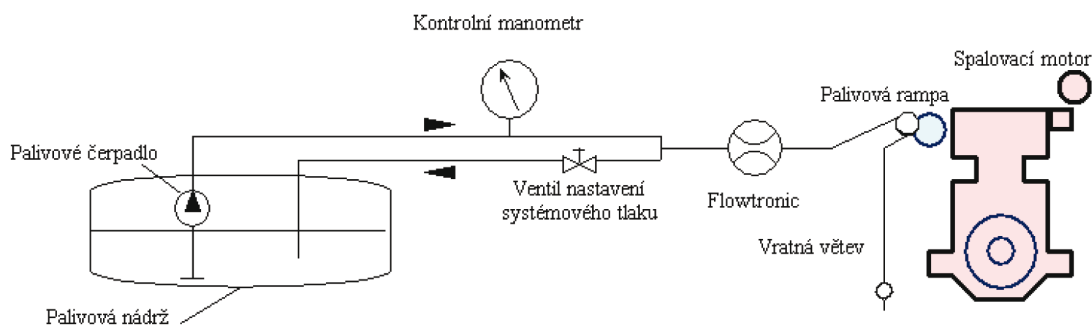
EOBD – viz obr. 1. Výkon byl měřen na válcovém dynamometru BR4VDM na Ústavu techniky a automobilové dopravy AF MZLU v Brně, který umožňuje měřit výkon 240 kW na nápravu při rychlosti až 200 km.h⁻¹.



1: Škoda Octavia 2.0 na vozidlovém dynamometru BR4VDM

Zařízení pro měření spotřeby paliva sestávalo z průtokoměru Flowtronic 206 (zapojení viz obr. 2) a termočlánku pro kontinuální záznam teploty paliva nutného pro přepočet na hmotnost spotřebovávaného paliva. Měření probíhalo při vnější otáčkové charakteristice statickou metodou, která reprezentuje maximální zatížení motoru. Vzhledem k faktu, že se jedná o automobil s automatickou převodovkou, je vý-

kon vztažen na kola vozidla. Charakteristika sestává ze šesti bodů; každý bod byl zaznamenáván po dobu 15 s (ustalování režimu 9 s) se záznamovou frekvencí 18,2 Hz, což reprezentuje 273 vzorků na bod, tedy 1638 vzorků za měření, které bylo třikrát opakováno pro dostatečný počet vzorků ke statistickému vyhodnocení pomocí programu Unistat.

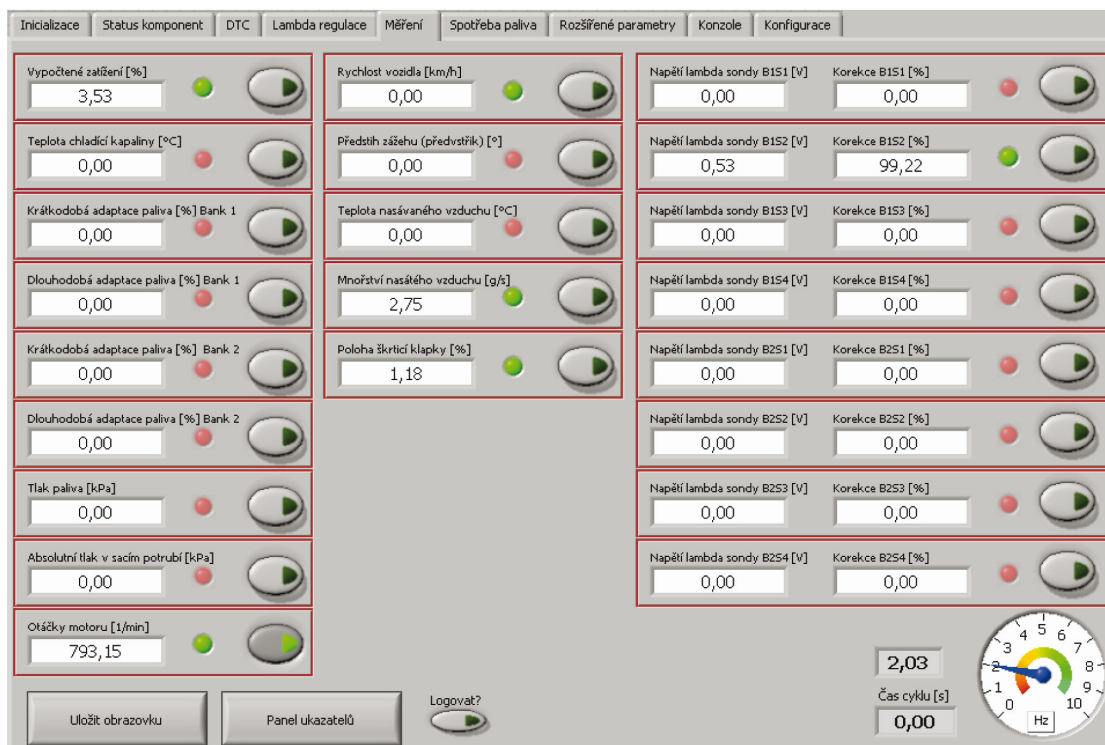


2: Schéma zapojení průtokoměru Flowtronic 206 v palivovém okruhu

Zjišťování spotřeby paliva u nových systémů vstřikování zážehových motorů se setkává se značnými úskalími při jejich zapojování do systému, neboť většinou dochází ke změnám systémového tlaku, na což musí systém řízení motoru reagovat; to se projeví např. v době otevření vstřikovacích ventilů či změnách v lambda regulaci. V práci jsou uvedeny dvě metody stanovení spotřeby paliva. Obě mají společný základ ve snímání množství nasávaného vzduchu do motoru, jehož výstup je realizován snímačem MAF (mass air flow). Ten je v systému OBD-2 zobrazován parametrem 0110_{hex} ve 2 bytech, tedy v rozlišení 16 bitů reprezentujících 65 535 úrovní a celková interpretace udává maximální hodnotu 655.35 g.s⁻¹ a nejmenší krok 0.01 g.s⁻¹ (SAE J1979). První metoda

pak vychází z hodnoty součinitele přebytku vzduchu lambda, druhá z přiřazení stechiometrického poměru k aktuálnímu množství nasátého vzduchu a násobení korekčními faktory krátkodobé a dlouhodobé adaptace.

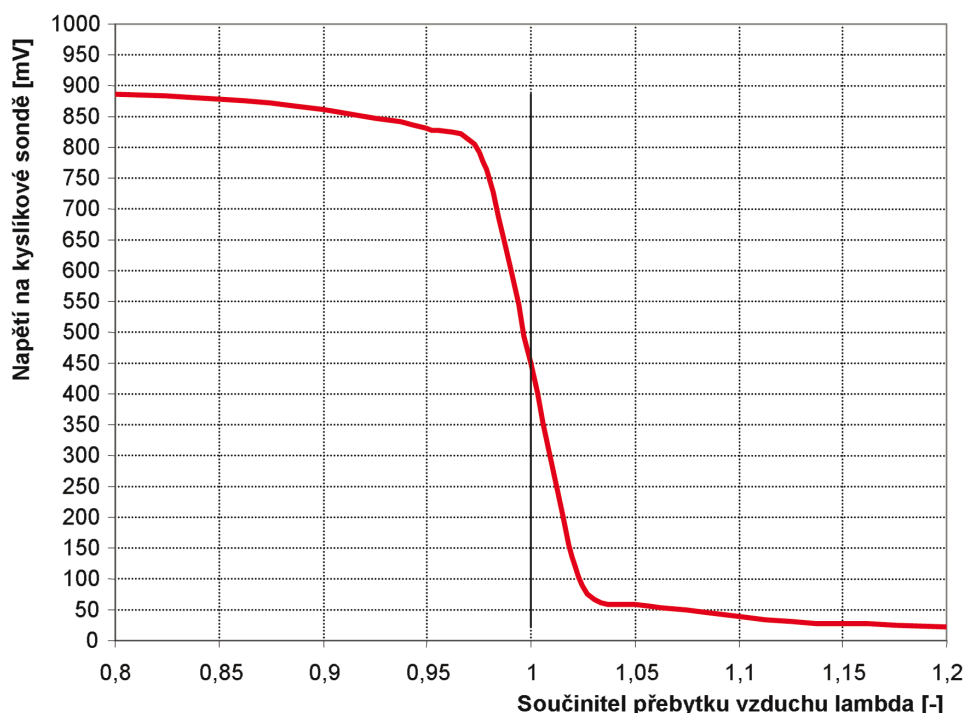
Přenos dat z palubní diagnostiky je realizován přes převodník OBD-2 / RS-232 ke zpracování v software, který jsem pro tento účel vyvinul a zakládá se na několika základních funkcích. První z nich je inicializace řídicí jednotky, dále výpis statusů systémů a subsystémů a nejdůležitějším oknem programu je záložka měření, kde probíhá smyčka čtení dat z palubní diagnostiky podle předdefinovaných parametrů. Software byl vytvořen ve vývojovém prostředí LabView a jeho grafická podoba je znázorněna na obrázku 3.



3: Panel měření vyvinutého software ke zprostředkování dat palubní diagnostiky

Součinitel přebytku vzduchu lambda ve výfukových plynech lze klasifikovat jako odchylku od stechiometrického poměru daného z chemického složení paliva a provozně je hodnota lambda sledována kyslíkovou sondou. Tento snímač existuje ve dvou základních provedeních, a to jako napěťový nebo odporový, čímž se zásadně také liší jejich charakteristiky. Regulace SAE J1979 (Diagnostic Test Modes) však trvá na napěťovém průběhu signálu kyslíkové sondy a výstupy konstrukčně jiných senzorů musí být upraveny tak, aby jejich charakteristika odpovídala průběhu napěťového snímače. Z tohoto pohledu tedy není třeba tuto metodu dále rozšiřovat o další výpočtové vztahy, pouze je nutné zajistit dostatečný počet vzorků napětí ke zjištění průměrné hodnoty na-

pětí na kyslíkové sondě – v případě, že řízení motoru pracuje v uzavřené lambda regulační smyčce, avšak to není případ vnější otáčkové charakteristiky. Podle pozice ve výfukovém traktu je číslován parametr napětí na kyslíkové sondě v rozmezí 0114_{hex} až 011B_{hex} v mezích 0–1,275 V s rozlišením 0,005 V. Z analogové podoby napěťového snímače lze přímo odečíst hodnotu součinitele přebytku vzduchu lambda – viz graf na obrázku 4. Měření analogového signálu se vzorkováním 200Hz bylo realizováno na univerzální kyslíkové sondě Bosch LSM11 a motoru Š 781.136 při ustálených otáčkách 2000 min⁻¹ a hodnota součinitele lambda byla odečtena analyzátozem Bosch ESA 3.250.



4: Napěťová charakteristika kyslíkové sondy

Průběh napětí na kyslíkové sondě nejlépe vystihuje rovnice (1), jejíž koeficienty – viz tabulka I, byly získány z regresní analýzy hodnot napětí na sondě a sou-

činitele lambda, statistické vyhodnocení koeficientů je provedeno v tabulce II, výsledky nelineární regresní analýzy jsou uvedeny v tabulce III.

$$U = \frac{a + c \cdot \lambda^2 + e \cdot \lambda^4 + g \cdot \lambda^6 + i \cdot \lambda^8 + k \cdot \lambda^{10}}{1 + b \cdot \lambda^2 + d \cdot \lambda^4 + f \cdot \lambda^6 + h \cdot \lambda^8 + j \cdot \lambda^{10}} \quad [\text{V}] \quad (1)$$

I: Koeficienty rovnice regresní analýzy funkce průběhu napětí kyslíkové sondy

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
1153,55	-3,41	-4669,26	3,92	7520,96	-1,17	-6021,91	-0,77	2394,02	0,43	-377,25

II: Statistické výsledky analýzy koeficientů

Koeficient	Hodnota koeficientu	Chyba střední hodnoty	t-test	Limity 95% konfidenčního intervalu		Hladina významnosti $P> t $
a	1153,552	0,073	15897,180	1153,375	1153,730	4,18E-24
b	-3,415	0,018	-188,281	-3,459	-3,370	1,51E-12
c	-4669,256	0,008	-621483,885	-4669,274	-4669,237	1,17E-33
d	3,921	0,084	46,623	3,715	4,127	6,52E-09
e	7520,957	0,048	155629,294	7520,838	7521,075	4,75E-30
f	-1,167	0,146	-7,982	-1,524	-0,809	2,06E-04
g	-6021,909	0,073	-82757,563	-6022,087	-6021,731	2,10E-28
h	-0,771	0,113	-6,840	-1,046	-0,495	4,80E-04
i	2394,022	0,040	59599,404	2393,924	2394,121	1,51E-27
j	0,431	0,032	13,265	0,351	0,510	1,13E-05
k	-377,251	0,085	-4414,889	-377,460	-377,042	9,12E-21

III: Výsledky regresní analýzy

Index determinace	Index korelace	Chyba střední hodnoty	Maximální absolutní chyba		
0,99999613	0,9999876	1,310585538	1,55146792		
	Součet čtverců	Stupně volnosti	MS	F vypočtené	Hladina významnosti (F)
Regrese	2661015,9	10	266101,59	154923	2,03311E-15
Rezidua	10,305807	6	1,7176345		
Celkem	2661026,2	16			

Z tabulky II a III plyne, že funkce velmi přesně popisuje naměřená data, což dokazuje i výsledek výpočtu hladiny významnosti F-testu, který činí 2,03311E-15, a tak velmi výrazně překračuje limitní hodnotu 0,001.

Výsledná hodnota hmotnostní hodinové spotřeby pak bude dána rovnicí (2).

$$M_{ph} = \frac{3,6 \cdot M_{air, maf}}{14,7 \cdot \lambda} \quad [\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}], \quad (2)$$

kde: $M_{air, maf}$ – hmotnost nasávaného vzduchu (g.s⁻¹)
 λ – součinitel přebytku vzduchu (-).

Druhá metoda vychází z principu termochemické kinetiky hoření paliva ve válci motoru, resp. zjednodušeně znalosti ideálního směšovacího poměru. Tato výchozí hodnota je konstantní a výsledná hodnota spotřeby paliva je úměrná množství nasávaného vzduchu dle vztahu (2), kde λ bude hodnotově reprezentovat 1. Tvzení platí pouze pro stavy, kdy je respektována stechiometrie. Bohužel však v provozu je výsledný směšovací poměr velmi variabilní, a proto je nutné zavést korekční faktor dávkování paliva, který v systému OBD-2 lze nalézt pod parametrem 0106_{hex} – krátkodobý korekční součinitel, 0107_{hex} – dlouhodobý korekční součinitel, resp. 0108_{hex}, 0109_{hex} pro

pozici druhé řady palivové rampy. Ve své podstatě se jedná o procentuální rozdíl dávky paliva od základní. Hodnota může nabývat 100 % až 99,22 % (Ribbens, 2003).

Spotřeba paliva pak bude vycházet ze vztahu (3).

$$M_{ph} = \frac{3,6 \cdot M_{air_maf}}{14,7} \cdot \frac{100 + f_{short} + f_{long}}{100} \text{ [kg.h}^{-1}\text{]}, \quad (3)$$

kde: M_{air_maf} – hmotnost nasávaného vzduchu (g.s^{-1})
 λ – součinitel přebytku vzduchu (-)
 f_{short} – korekční faktor krátkodobé adaptace paliva (%)
 f_{long} – korekční faktor dlouhodobé adaptace paliva (%).

VÝSLEDKY A DISKUSE

Obě metody byly testovány při vnější otáčkové charakteristice, jejíž výsledky jsou uvedeny v tabulce IV.

IV: Výkonové parametry vozu

Otáčky motoru	Výkon na kolech vozu	Točivý moment na kolech vozu	Směrodatná odchylka Výkon	Směrodatná odchylka Moment
(min^{-1})	(kW)	(Nm)	(kW)	(Nm)
3661	45,96	119,89	0,48	1,06
4115	53,20	123,44	0,30	0,64
4600	59,30	123,10	0,10	0,18
5101	62,48	116,96	0,30	0,52
5642	64,91	109,85	0,04	0,06
6184	61,83	95,47	0,08	0,12

Hodnoty spotřeb průtokoměru Flowtronic jsou položeny jako základna pro statistické vyhodnocení obou navrhovaných metod. Výsledky měření průtokoměrem jsou uvedeny v tabulce V.

Vzhledem k faktu, že postup výpočtu pro obě metody vychází z množství nasátého vzduchu, jsou tyto uvedeny v tab. VI.

V: Spotřeba paliva naměřená komparačním průtokoměrem Flowtronic 206

Otáčky motoru	Hmotnostní hodinová spotřeba				Směrodatná odchylka
	(kg.h ⁻¹)				
(min ⁻¹)	Test 1	Test 2	Test 3	Průměr	(kg.h ⁻¹)
3661	19,03	19,35	19,13	19,17	0,135
4115	21,18	21,32	21,41	21,31	0,097
4600	24,19	23,92	24,19	24,10	0,130
5101	26,43	26,39	26,62	26,48	0,099
5642	28,08	27,01	27,65	27,58	0,439
6184	27,49	27,06	27,58	27,38	0,230

VI: Množství nasávaného vzduchu do motoru

Otáčky motoru (min ⁻¹)	Množství nasávaného vzduchu (g.s ⁻¹)				Směrodatná odchylka (g.s ⁻¹)
	Test 1	Test 2	Test 3	Průměr	
3661	63,625	62,875	64,125	63,54	0,514
4115	72,750	72,333	71,375	72,15	0,576
4600	80,625	81,125	81,083	80,94	0,227
5101	85,000	84,500	83,917	84,47	0,443
5642	88,688	89,000	89,563	89,08	0,362
6184	92,667	90,438	91,375	91,49	0,914

Výpočet spotřeby paliva z napětí na kyslíkové sondě

Z výsledků uvedených v tabulce VII jsou patrné výrazné odchylky od spotřeby paliva komparačního průtokoměru. Průměrná odchylka činí -14,3 % a maximální -19,9 %. Ze stranové výchylky hodnot lze usuzovat, že měření je zatíženo systematickou chybou. Příčina této nepřesnosti je třeba hledat v Nerstově rovnici (4), která udává elektrický potenciál článku (Lee, 1999).

$$E = - \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \cdot \ln \left(\frac{p(O_2)_{test}}{p(O_2)_{ref}} \right) \quad [\text{V}], \quad (4)$$

kde: R – univerzální plynová konstanta (J.K⁻¹.mol⁻¹)

T – termodynamická teplota článku (K)

z – počet přenesených elektronů (-)

F – Faradyova konstanta (C.mol⁻¹)

$p(O_2)_{test}$ – parciální tlak kyslíku ve spalínách (Pa)

$p(O_2)_{ref}$ – parciální tlak kyslíku ve vzduchu (Pa).

Jak plyne z rovnice (4), je výpočet silně závislý na teplotě článku, resp. spalin a to zejména v oblasti velmi bohaté směsi, kde se celá napěťová charakteristika výrazně mění.

VII. Výsledky výpočtu spotřeby paliva metodou snímání napětí kyslíkové sondy

Otáčky motoru (min ⁻¹)	Diference hmotnostní hodinové spotřeby (%)				Směrodatná odchylka (%)
	Test 1	Test 2	Test 3	Průměrná odchylka	
3661	-9,45	-9,49	-8,06	-9,00	0,665
4115	-10,09	-10,47	-12,28	-10,95	0,956
4600	-13,64	-12,88	-13,97	-13,50	0,459
5101	-17,63	-17,89	-19,23	-18,25	0,698
5642	-19,85	-16,99	-17,92	-18,25	1,193
6184	-15,06	-16,15	-16,47	-15,89	0,604

Výpočet spotřeby paliva z korekčních faktorů adaptace paliva

Adaptační hodnoty dávky paliva vystihují reakce na změnu podmínek oproti základním údajům uloženým v paměti řídicí jednotky standardizovaným k barometrickým podmínkám a k tolerančním po-

lím snímačů řídicích veličin. V případě vnější otáčkové charakteristiky, kdy dochází k otevření lambda regulační smyčky, se směs obohacuje programově, a to výrazně zejména v oblasti maximálního výkonu (Štěrbá, 2004). Hodnoty výpočtu jsou uvedeny v tab. VIII.

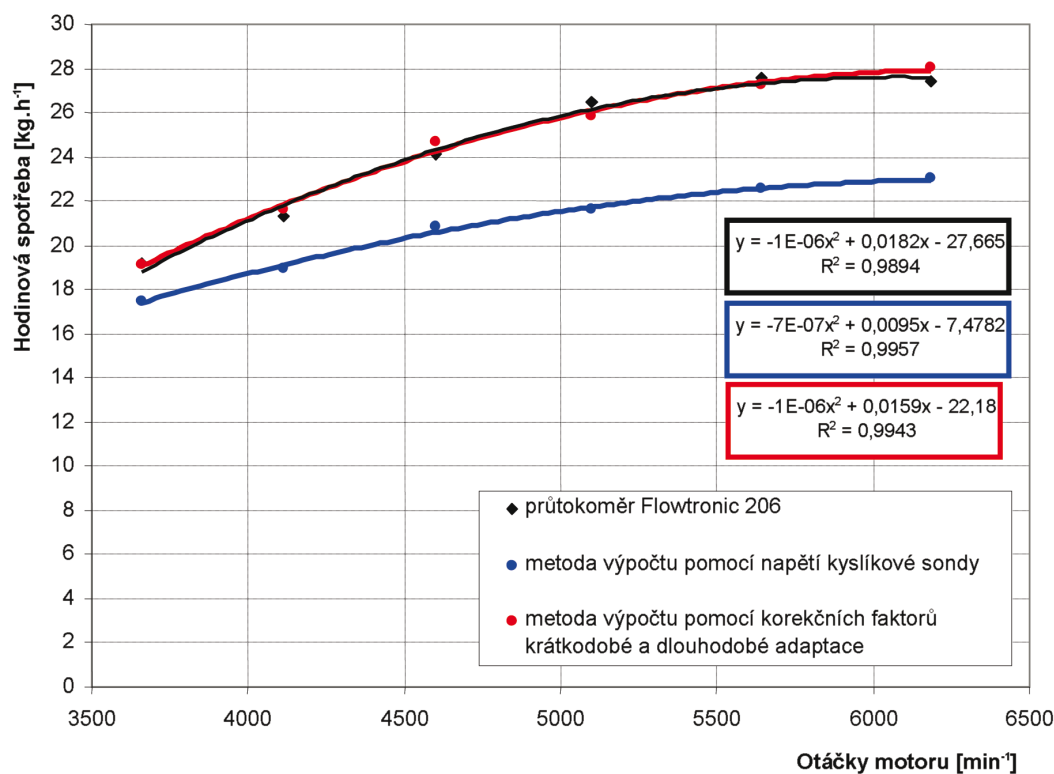
VIII: Výsledky výpočtu spotřeby paliva pomocí korekčních faktorů adaptace dávky paliva

Otáčky motoru (min ⁻¹)	Diference hmotnostní hodinové spotřeby (%)				Směrodatná odchylka (%)
	Test 1	Test 2	Test 3	Průměrná odchylka	
3661	-1,33	0,08	0,21	-0,35	0,699
4115	0,77	4,28	-0,36	1,56	1,974
4600	0,77	4,49	2,38	2,55	1,525
5101	-2,15	-1,37	-3,48	-2,34	0,872
5642	-3,93	1,49	-0,84	-1,09	2,219
6184	2,55	2,97	1,40	2,31	0,660

Z tab. VIII plyne, že přesnost výpočtu v porovnání s první metodou je vyšší (průměrná odchylka celého měření činí 0,4 %, maximální pak 4,5 %). Pro ilustraci, v případě měření vnější otáčkové charakteristiky statickou metodou dochází k průměrnému posunu krátkodobé adaptace o hodnotu 23,4 % a u dlouhodobé adaptace o 0,8 %.

Z výsledků jasně plyne, že metoda výpočtu spotřeby paliva z napětí na kyslíkové sondě je pro účely měření nevhodná vzhledem ke své silné závislosti na teplotě spalin, kterou nelze provozně jednoduše sní-

mat, zatímco výsledky metody založené na korekci z adaptace paliva vykazuje relativně vysokou přesnost měření, jak je patrné z grafu na obrázku 5, koeficient korelace mezi daty průtokoměru a daty vypočtenými z adaptace dávky paliva činí 0,98063. V obou metodách je ovšem zanesena systematická chyba, neboť stechiometrický poměr je vyjádřen hodnotou 14,7. Je nutno si uvědomit, že tato metoda nenahrazuje vysoce přesné průtokoměry, ale lze ji použít pro orientační měření bez nutnosti zásahu do palivové soustavy.



5: Srovnání výsledků měření obou metod stanovení spotřeby paliva

SOUHRN

V práci je popsána nepřímá metoda stanovení spotřeby paliva zážehového motoru založená na využití parametrů palubní diagnostiky OBD-2 při vnější otáčkové charakteristice. Navržený algoritmus výpočtu vychází ze znalosti stechiometrie a základní veličinou je množství nasávaného vzduchu do motoru. Jsou popsány dvě metody stanovení spotřeby paliva. První se opírá o výpočet směšovacího poměru, který prezentuje napětí na kyslíkové sondě. Druhá pak o násobení základní dávky paliva korekčním faktorem součtu krátkodobé a dlouhodobé adaptace paliva. Z výsledků vyplývá, že nelze použít napěťový signál kyslíkové sondy vzhledem ke značné závislosti na teplotě spalin v oblasti velmi bohaté směsi. Průměrná diference oproti spotřeboměru činila $-14,3\%$. Naopak výpočetní metoda s korekcí krátkodobé a dlouhodobé adaptace se ukázala jako velmi přesná a průměrná chyba měření byla $0,4\%$, přičemž maximální odchylka při měření dosáhla $4,5\%$.

spotřeba paliva, palubní diagnostika, kyslíková sonda, adaptace paliva

LITERATURA

- BALENOVIĆ, M.: Modeling and Model-Based Control of a Three Way Catalyst Converter, Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2002, 179 s., ISBN 90-386-1900-6
- BROWN, W.: Defining Engine Closed-Loop Control for Individual Cylinder Signaturing, Monash University, 2004, Research Thesis, 50 s.
- LEE, J. H., KIM, B. K., LEE, K. Y., KIM, H. I., HAN,

- K. W.: A new catalyst monitoring sensor for gasoline engine using YSZ–Al₂O₃ as solid electrolyte and gas diffusion barrier, Sensors and Actuators B, 1999, 59: 9-15, ISSN 0925-4005
- RIBBENS, W. B.: Understanding Automotive Electronics, 6. vyd. USA: Newnes, 2003. 470s. ISBN 0-7506-7599-3
- ŠTERBA, P.: Elektrotechnika a elektronika automobilů, 1.vyd. Brno: Computer Press, 2004. 182s. ISBN 80-251-0211-4

Adresa

Ing. Jiří Čupera, Doc. Ing. Miroslav Havlíček, CSc., Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika

