

Boran Pikula, Ivan Filipović, Dževad Bibić, Murad Džeko

ISSN 0350-350X

GOMABN 49, 2, 109-130

Izvorni znanstveni rad/Original scientific paper

UDK 621.433/.434 : 665.632 : 665.733.5 : 531.768 : 621.43.018.7 : 621.43.03-545 :

METODA BRZE PROVJERE OSNOVNIH KARAKTERISTIKA MOTORA PRI UPORABI RAZLIČITIH GORIVA

Sažetak

Stalna utrka za postizanjem niskih emisija zagađujućih tvari u ispušnim plinovima motornih vozila obilježena je primjenom novih tehničkih i tehnoloških rješenja u sustavima za pripremu smjese kod motora s unutarnjim izgaranjem (MSUI), poboljšanju procesa izgaranja, naknadnoj obradi ispušnih plinova, te primjeni alternativnih goriva. Prednost pri uporabi alternativnih goriva kod MSUI za pogon motornih vozila imaju ona goriva kod kojih se ne zahtijevaju veće preinake motora. Pri tome se biogoriva i ukapljeni naftni plin (UNP, engl. LPG) nameću kao najbolja, posebno gorivo UNP za koje već postoji solidna infrastruktura opskrbe.

Primjena MSUI s mogućnošću rada pri uporabi benzina i UNP danas predstavlja najčešće rješenje pogona motornih vozila. Pored ekoloških aspekata korištenja UNP, najvažniji utjecajni parametar za ugradnju sustava za uporabu UNP je ekonomski, s obzirom da je cijena ovog goriva danas značajno manja od cijene benzina. Iako proizvođači sustava za uporabu UNP omogućuju lagan prelazak rada motora s benzina na UNP, može se postaviti pitanje kako sustav za dobavu UNP-a utječe na karakteristike MSUI.

U radu su prezentirani rezultati istraživanja usporednih osnovnih karakteristika MSUI pri uporabi benzina i UNP-a na konkretnom primjeru vozila. Za određivanje spomenutih karakteristika izvršeno je snimanje dinamičkih karakteristika vozila, a zatim računskim putem određene brzinske karakteristike motora. Presudnu ulogu na ove karakteristike ima način uvođenja UNP u prostor za izgaranje i podešenost parametara sustava.

1. Uvod

U suvremenom svijetu velika se pozornost poklanja problemu onečišćenja životne sredine, nastalog kao posljedica ubrzanog razvoja tehnologije i povećanja svjetske populacije. Mnogi od plinova nastalih izgaranjem fosilnih goriva su značajni zagađivači na lokalnoj i na globalnoj razini. Na lokalnoj razini, u gusto naseljenim urbanim regijama, emisija ugljikovog monoksida (CO), neizgorjelih ugljikovodika

(C_xH_y), sumpornih i dušikovih oksida (NO_x) vrlo je značajna zbog njihovog udjela u formiranju smoga. Na globalnoj razini značajna je emisija CO_2 , metana i određenih dušikovih oksida, kao plinova koji pospješuju efekt staklenika. Kako su konvencionalna goriva za pogon motornih vozila, benzin i dizelsko gorivo, ugljikovodična goriva, pri njihovom izgaranju u realnim uvjetima, pored ugljikovog dioksida (CO_2) i vode (H_2O), emitiraju se i produkti nepotpunog izgaranja, kao što su ugljikov monoksid, dušikovi oksidi, neizgorjeli ugljikovodici, čestice, te razni policiklični aromatski ugljikovodici (engl.– *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons PAH*) i ostale isparive organske komponente (engl.– *Volatile Organic Compound VOC*). Zakonski je propisana dozvoljena emisija CO , NO_x , C_xH_y i čestica (tzv. „regulirana“ emisija), dok emisija ostalih komponenti još uvijek nije zakonski regulirana (tzv. „neregulirana“ emisija). Pored toga, zbog sve prisutnijeg fenomena globalnog zagrijavanja atmosfere, vrlo je značajna i emisija plinova koji pridonose efektu staklenika, kao što su CO_2 , CH_4 , N_2O .

Najčešće korištene mjere u cilju smanjenja emisija zagađujućih tvari iz motornih vozila su:

- primjena novih tehničko-tehnoloških rješenja na MSUI (suvremeni sustavi kontrole procesa izgaranja, obrada ispušnih plinova, itd.),
- regulacijske i poticajne mjere za smanjenje emisija, kao i tehnologije kontrole emisija,
- poboljšanje efikasnosti goriva,
- primjena alternativnih goriva i
- upravljanje zahtjevima prijevoza.

Od nabrojanih mjera, samo primjena alternativnih goriva omogućava smanjenje emisija zagađujućih tvari iz motornih vozila svih generacija. Ako se uzme u obzir činjenica da je prosječna starost voznog parka u zemljama regije veća od 15 godina, što automatski znači da gotovo polovina pogonskih agregata za pogon motornih vozila ne posjeduje ni najprimitivniji regulacijski sustav za udovoljavanje čak i početne EURO 1 norme, primjena alternativnih goriva predstavlja odlično rješenje za smanjenje emisija zagađujućih tvari. Međutim, prednost pri uporabi alternativnih goriva kod MSUI za pogon motornih vozila imaju ona goriva kod kojih se ne zahtijevaju veće prepravke motora, pri čemu se posebno nameće gorivo UNP za koje već postoji solidna infrastruktura opskrbe.

Uporaba MSUI s mogućnošću rada pri uporabi benzina i UNP danas predstavlja najčešće rješenje pogona motornih vozila. Pored ekoloških aspekata uporabe UNP, najvažniji utjecajni parametar za ugradnju sustava za uporabu UNP je ekonomski, s obzirom da je cijena ovog goriva značajno manja od cijene benzina. Iako proizvođači sustava za uporabu UNP omogućavaju lagan prijelaz rada motora s benzina na UNP, može se postaviti pitanje kako sustav za dovođenje UNP u motor i pripremu smjese utječe na karakteristike MSUI. Odgovor na postavljeno pitanje se pokušao pronaći u razvoju brze metode za određivanje osnovnih karakteristika MSUI, što je bio osnovni cilj ovog rada.

2. Vozilo s pogonom na benzin i UNP

2.1 Općenito o uporabi UNP na motornom vozilu

Za razliku od konvencionalnih goriva, UNP je pri standardnim atmosferskim uvjetima u plinovitom stanju, tako da postoje razlike u distribuciji i tehnološkim zahtjevima koji se stavljaju pred vozila koja rabe UNP.

U motornim vozilima UNP je najčešće smješten u cilindrične spremnike pod tlakom od 6 do 8 bara, što zahtijeva dodatni prostor na vozilu. Spremnik za UNP zauzima oko 2 puta više prostora i oko 1,5 puta je teži od spremnika za benzin za isti sadržaj energije. Zbog manjeg energetske sadržaja po jedinici volumena [7] u odnosu na konvencionalna goriva, za isti volumen spremnika, vozila pogonjena UNP-om imaju do 30 % manji domet. Međutim, uz dobru mrežu crpki, te za vozila koja se pretežito koriste u urbanom prometu, to ne predstavlja veliki nedostatak. Pri prilagođavanju vozila uporabi UNP-a, pored spremnika pod tlakom za skladištenje goriva, potrebno je izvršiti i rekonstrukciju sustava za dobavu goriva u motor (vodovi, regulator tlaka, mješač zrak/UNP).

Motori koji rabe UNP mogu se izvesti tako da rabe isključivo UNP (engl. *dedicated UNP*) ili da imaju mogućnost uporabe i konvencionalnog goriva i UNP-a - tzv. bivalentni motori (engl. *bi-fuel*). U drugom slučaju korisnik jednostavnim pritiskom na prekidač može izabrati željeno pogonsko gorivo.

U slučaju tvorničke rekonstrukcije MSUI za primjenu UNP potrebno je iskoristiti njegove pozitivne strane i prema njima podesiti optimalne parametre motora (kompresijski omjer, kut pretpaljenja, itd.) u cilju dobivanja odgovarajućih energetske karakteristika. Međutim, u većini slučajeva na motorima se podešavaju isključivo optimalni parametri za slučaj uporabe benzina, tako da pri uporabi UNP-a u konkretnom primjeru može biti nekih odstupanja u energetske karakteristikama MSUI koje daju i nešto lošije dinamičke karakteristike vozila. Emisija zagađivača u ispušnim plinovima MSUI uglavnom ovisi o podešenim parametrima MSUI, koji direktno utječu na proces izgaranja. Za iste uvjete izgaranja benzina i UNP, sa stajališta emisije zagađujućih tvari u ispušnim plinovima, prednost je na strani UNP zbog njegovog kemijskog sastava.

2.2 Osnovne karakteristike testnog vozila

Za provođenje istraživanja pogona motornog vozila pomoću benzina i UNP izabrano je lako dostavno vozilo *Opel Combo* s Ottovim motorom *1.4 Twinport Ecotec*, čije su osnovne karakteristike date u tablici 1 [9]. Na vozilu je dodatno ugrađen kompletan sustav za uporabu UNP. Međutim, osim mogućnosti uporabe UNP kao alternativnog pogonskog goriva [8] ne postoje dodatne informacije o karakteristikama motora (snazi, zakretnom momentu, potrošnji goriva), ali i osnovnim dinamičkim karakteristikama vozila u pogledu vremena ubrzavanja, postizanja maksimalne brzine, itd. Imajući u vidu kompleksnost ispitivanja na probnom stolu (kočnica ili valjci) brzinskih karakteristika motora, nakon dodatne ugradnje sustava za uporabu

UNP, razvijena je metoda određivanja osnovnih karakteristika motora dobivenih na osnovi eksperimentalnih istraživanja dinamičkih karakteristika vozila koja je prikazana u nastavku.

Tablica 1: Osnovne karakteristike vozila Opel Combo 1.4 Twinport Ecotec

Karakteristike vozila Opel Combo 1.4 I Twinport Ecotec			
Pogonsko gorivo	Benzin	Čelna površina A , m^2	2,58
Sustav dobave goriva	MPI, Motor management sistem, GM - Multec	Koeficijent otpora oblika c_x , -	0,35
Sustav paljenja goriva	Motor management sistem, GM - Multec	Prijenosni odnosi u mjenjaču	
Radni volumen motora V , cm^3	1364	1. stupanj - i_1	3,73
Snaga motora $P_{e,MAX}$, kW	66 pri 5600 min^{-1}	2. stupanj - i_2	1,96
Moment motora $M_{e,MAX}$, Nm	125 pri 4000 min^{-1}	3. stupanj - i_3	1,31
Najveća brzina v_{MAX} , km/h	164	4. stupanj - i_4	0,95
Vrijeme ubrzanja t_{0-100} km/h , s	14,0	5. stupanj - i_5	0,76
Masa praznog vozila m_v , kg	1280	Stupanj za vožnju unatrag - i_R	3,31
Korisna nosivost m_T , kg	520	Prijenosni odnos u glavnom prijenosniku	
Ukupna dozvoljena masa m_{UK} , kg	1800	i_0	3,94
Potrošnja goriva 1999/100/EU - u gradu - izvan grada - prosječna	8,0-8,3 $l/100 \text{ km}$ 5,3-5,6 $l/100 \text{ km}$ 6,3-6,6 $l/100 \text{ km}$	Kotači: - naplatak - pneumatici - dinamički polumjer r_d , m	5,5Jx14 175/65 R 14 0,31

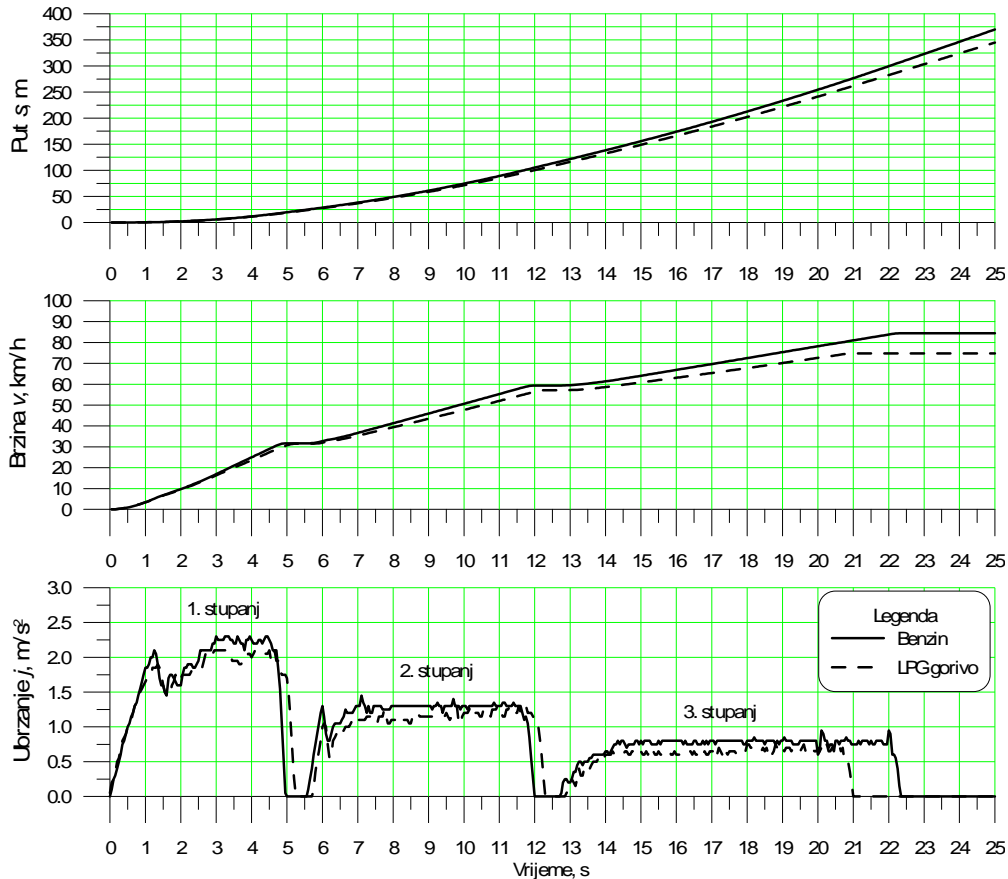
3. Metoda određivanja brzinskih karakteristika motora

Za određivanje dinamičkih karakteristika vozila u procesu ubrzanja vozila uporabljen je uređaj za mjerenje ubrzanja, odnosno usporenja. Radi se o univerzalnom uređaju čiji se princip rada zasniva na mjerenju inercijske sile, a koji se može susresti u različitim kompletima opreme, od opreme za terenska ispitivanja vozila do opreme za specifična terenska ispitivanja.

Provjera dinamičkih karakteristika testnog vozila pri uporabi oba goriva obavljena je mjerenjem ubrzanja pri polasku vozila iz mjesta. S obzirom da se radi o lakom dostavnom motornom vozilu, posebna pozornost je posvećena utjecaju opterećenja korisnim teretom, a u ovom slučaju je podešeno da masa korisnog tereta i težina vozača dostignu, s masom praznog vozila, ukupnu dopuštenu masu od 1800 kg.

S ciljem određivanja dinamičkih karakteristika vozila pri ubrzanju vozila iz mjesta, pri uporabi benzina i UNP, testni vozač je uvijek pritisnuo papučicu gasa do kraja i nastojao izvršiti promjenu stupnja prijenosa kod približno istih brzina vrtnje motora. Mjerenja su izvršena na istoj testnoj dionici dužine 1 km u urbanoj sredini koju

karakterizira horizontalna konfiguracija tla, tj. bez nagiba ili pada. Rezultati mjerenja ubrzanja na spomenutoj testnoj dionici pri uporabi benzina i UNP su prikazani na slici 1.



Slika 1: Dinamičke karakteristike vozila ostvarene na testnoj dionici

Iz slike 1 se vidi da su pri uporabi različitih pogonskih goriva i pri punom položaju papučice gasa ostvarene različite dinamičke karakteristike vozila (ubrzanje, brzina i prijeđeni put) što se može opravdati različitim karakteristikama motora. Koristeći osnovne zakonitosti dinamike vozila [3] i [4], te poznavajući ostvarene (izmjerene) vrijednosti ubrzanja vozila, osnovne karakteristike motora mogu se odrediti računskim putem.

Ubrzanje vozila u pojedinom stupnju prijenosa mjenjača (m) može se odrediti iz izraza:

$$j_{mj} = \frac{g}{\lambda_{mj}} (D_{mj} - f) \quad (1)$$

gdje su: g – ubrzanje sile zemljine teže, D_{mj} – dinamički faktor (karakteristika) u pojedinom stupnju prijenosa mjenjača, f – koeficijent otpora valjanja, λ_{mj} – koeficijent utjecaja rotirajućih masa.

Najveću primjenu danas našao je izraz za definiranje koeficijenta otpora valjanja [5] dat u obliku:

$$f = f_0 + f_1 v + f_2 v^A \quad \text{za } v \text{ izraženu u m/s} \quad (2)$$

gdje su, za radijalne pneumatike i velike brzine vozila, vrijednosti prethodnih koeficijenata:

$$f_0 = 9,91 \cdot 10^{-3}, \quad f_1 = 1,95 \cdot 10^{-5}, \quad f_2 = 1,76 \cdot 10^{-9}$$

Koeficijent utjecaja rotirajućih masa ovisi o konstrukcijskim karakteristikama motora i vozila, a prema [4] izračunava se prema izrazu:

$$\lambda_{mj} = 1 + \frac{g}{G} J_m \frac{i_{mj}^2 i_0^2 \eta_{mj} \eta_0}{r_d^2} + \frac{g}{G} \sum J \frac{1}{r_d^2} \quad (3)$$

gdje su karakteristični parametri u izrazu (3): J_m – moment inercije rotacijskih masa motora, $\sum J_t$ – moment inercije rotacijskih masa vozila, i_{mj} – prijenosni odnos u određenom stupnju prijenosa mjenjača, i_0 – prijenosni odnos u glavnom prijenosniku, η_{mj} – stupanj korisnosti mjenjača u određenom stupnju prijenosa, η_0 – stupanj korisnosti glavnog prijenosnika, G – težina vozila i r_d – dinamički polumjer kotača.

Ako se ne poznaju momenti inercije rotacijskih masa motora i vozila, koeficijenti utjecaja rotirajućih masa se približno mogu odrediti pomoću različitih empirijskih izraza danih u [4].

Tablica 2: Stupnjevi korisnosti transmisije

Stupanj prijenosa	1.	2.	3.	4.	5.
Stupanj korisnosti transmisije η_{mj}	0,95	0,96	0,96	0,97	0,98
Glavni prijenosnik					
Stupanj korisnosti η_0	0,97				

Imajući u vidu prijenosne odnose u pojedinim stupnjevima prijenosa mjenjača i glavnog prijenosnika izračunati su stupnjevi korisnosti koji su prikazani u tablici 2.

Konačno se može pristupiti određivanju dinamičkog faktora (karakteristike) u pojedinom stupnju prijenosa tijekom ubrzavanja lakog dostavnog vozila na testnoj dionici korištenjem sljedećeg izraza:

$$D_{mj} = \frac{\lambda_{mj}}{g} j_{mj} + f \quad (4)$$

Dinamički faktor predstavlja modifikaciju vučne sile, a uveden je s ciljem transparentnije analize dinamike kretanja vozila. Polazeći od definicije dinamičkog faktora:

$$D_{mj} = \frac{F_{O,mj} - R_V}{G} \quad (5)$$

moгу se odrediti vrijednosti pogonske sile na kotaču $F_{O,mj}$ u određenom stupnju prijenosa mjenjača:

$$F_{O,mj} = D_{mj} G + R_V = D_{mj} G + \frac{1}{2} \rho c_x A v^2 \quad (6)$$

Korištenjem izraza (6) dobivene su vrijednosti pogonske sile na kotaču koje su u ovisnosti o ostvarenom ubrzanju na testnoj stazi prikazane na slici 2. Poznavajući vrijednosti pogonske sile na kotaču i karakteristične parametre sustava prijenosa snage, mogu se odrediti ostvarene vrijednosti pogonskog momenta na kotaču (M_O), zakretnog momenta motora (M_e) koji se iskoristi za pogon vozila, kao i brzine vrtnje motora tijekom procesa ubrzavanja. Ovisnost navedenih veličina može se izraziti pomoću sljedećih izraza:

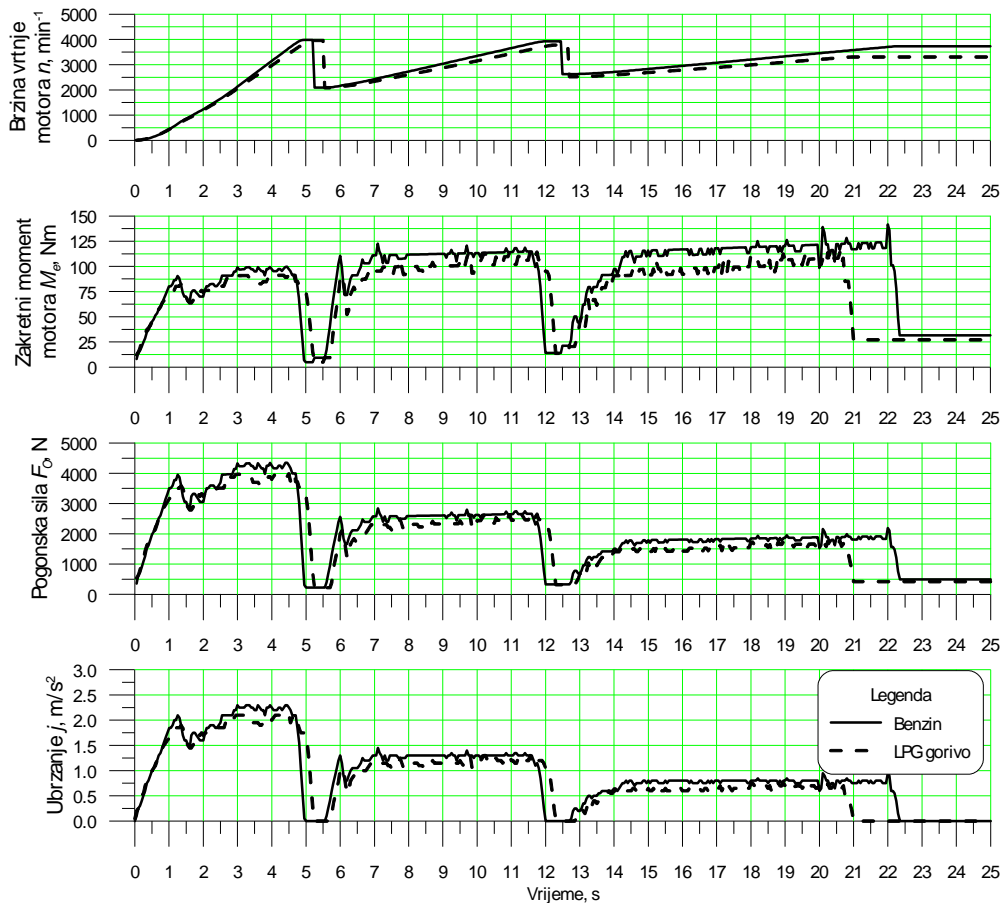
$$M_O = F_{O,mj} r_d \quad \rightarrow \quad M_e = \frac{F_{O,mj} r_d}{i_{mj} i_0 \eta_{mj} \eta_0} \quad (7)$$

$$\omega_e = \frac{v}{r_d} i_{mj} i_0 \quad \text{ i } \quad n = \frac{\omega_e}{2\pi} \quad (8)$$

Dijagramski prikaz dinamičkih karakteristika vozila i karakteristika motora ostvarenih tijekom procesa ubrzavanja na testnoj dionici prikazan je na slici 2.

Analizom rezultata prikazanih na slici 2 može se uočiti da se postizanje različitih ubrzanja vozila pri uporabi različitih goriva može opravdati ostvarivanjem različitih

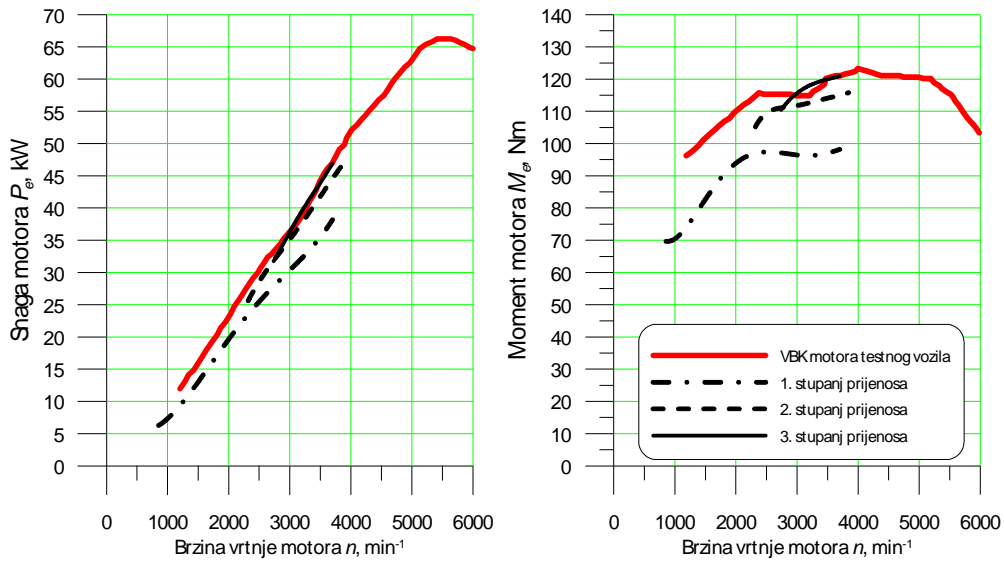
pogonskih sila, odnosno različitih zakretnih momenata motora. Važno je napomenuti da je zakretni moment motora određen na osnovi prenesenog momenta na kotaču, što kod polaska vozila iz mjesta, zbog klizanja spojke u vremenskom razdoblju 0-1,5 s, ne daje stvarnu vrijednost zakretnog momenta motora.



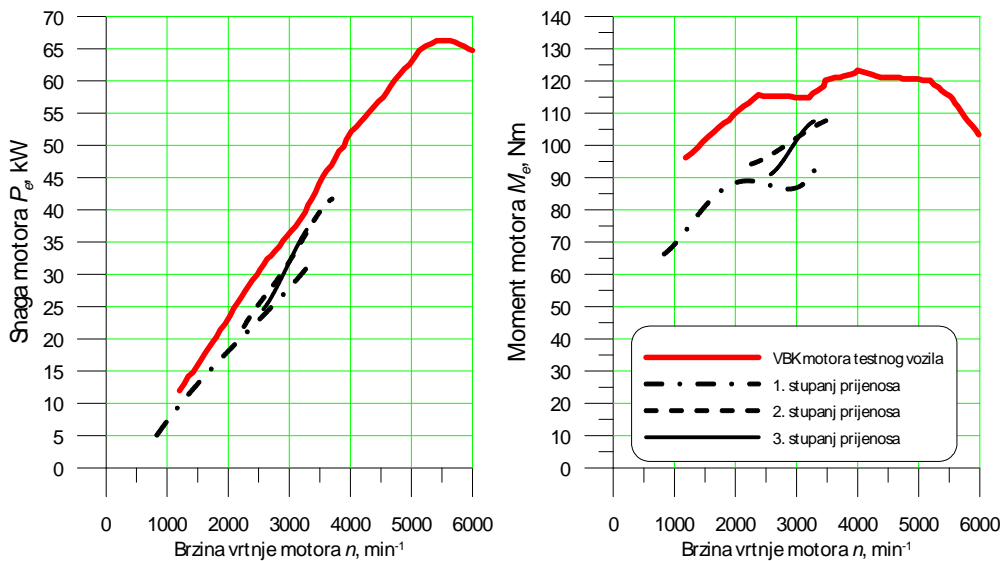
Slika 2: Usporedni prikaz dinamičke karakteristike vozila i karakteristika motora

Također, kad se govori o polasku vozila iz mjesta, zbog mogućeg proklizavanja pogonskih kotača, te kasnije tijekom ubrzavanju vozila u 1. stupnju prijenosa, zbog velikih inercijskih sila i kratkog vremena ubrzavanja, nije moguće stalno držati maksimalni položaj papučice gasa čega je posljedica korištenje manjih vrijednosti zakretnog momenta motora za pogon vozila. Međutim, promjenom stupnja prijenosa u 2. ili 3. stupanj prijenosa, vozač je u stanju da u vrlo kratkom razdoblju pritisne papučicu gasa do kraja omogućujući korištenje maksimalnih zakretnih momenata

motora za proces ubrzavanja približavajući se vanjskim brzinskim karakteristikama (VBK) koje je deklarirao proizvođač vozila [9], što se najbolje vidi na slikama 3 i 4.



Slika 3: Brzinske karakteristike snage i momenta motora pri korištenju benzina



Slika 4: Brzinske karakteristike snage i momenta motora pri korištenju UNP

Analizirajući brzinske karakteristike motora dobivene proračunom na osnovi izmjerenih dinamičkih karakteristika vozila tijekom procesa ubrzavanja, pri maksimalnom položaju papučice gasa i pri uporabi različitih goriva, može se zaključiti da razvijena metoda predstavlja efikasan način provjere osnovnih karakteristika motora. Poželjno je da se kod primjene ove metode raspolaze s rezultatima mjerenja ubrzanja u svim stupnjevima prijenosa u cijelom radnom području brzina vrtnje motora.

Na osnovi prikazanih rezultata dolazi se do zaključka da se pri uporabi UNP, kao alternativnog goriva za pogon konkretnog motornog vozila, postižu niže vrijednosti snage i zakretnog momenta motora. Objašnjenje za ovu razliku, pod uvjetom jednakih unesenih energija s oba goriva, moguće je tražiti u procesu izgaranja u motoru. Naime, proces izgaranja UNP u MSUI može imati manju efikasnost zbog:

- Različitih fizikalnih karakteristika UNP u odnosu na benzin.
- Drugaćijeg procesa dovođenja goriva u motor. Benzin se ubrizgava direktno ispred usisnih ventila svakog cilindra, a UNP se dovodi pomoću ventila za doziranje na početku svake usisne cijevi prema cilindrima. Ovaj drugi postupak očigledno ima nešto veće hidrauličke gubitke u procesu formiranja smjese zrak/UNP u motor, kao i nešto povećane gubitke goriva u tijekom prekrivanja ventila, itd.
- Uporabe UNP u MSUI, čiji su karakteristični parametri optimirani za benzin.

4. Zaključak

Na osnovi provedene opsežne analize primjene UNP u benzinskim motorima i rezultata danih u ovom radu može se zaključiti:

1. Primjena UNP, kao alternativnog goriva, u motornim vozilima s Ottovim ili benzinskim motorima je prilično raširena očito zbog ekonomskih učinaka i niže emisije zagađujućih tvari u ispušnim plinovima.
2. Gorivo UNP se najčešće rabi u kombinaciji s benzinom, tzv. „bivalentni“ motori, gdje su karakteristike MSUI optimirane prema benzinu. U podešavanju istog motora na UNP podešava se samo unesena količina goriva preko jednakosti energije u gorivu što nije jamstvo da su zadržane iste i brzinske karakteristike motora s pogonom na UNP kao kod pogona na benzin.
3. Razvijena je i u radu prezentirana vrlo jednostavna metoda provjere brzinskih karakteristika motora pri korištenju različitih goriva. Za ovu metodu korišten je vrlo jednostavan uređaj inercijskog tipa za mjerenje ubrzanja/usporenja i vlastito razvijeni računalni program za izračun brzinskih karakteristika MSUI.
4. Prezentirana metoda može poslužiti za brzo podešavanje sustava za dobavu alternativnog goriva (u konkretnom slučaju UNP) u svrhu uspostavljanja odgovarajućih brzinskih karakteristika MSUI i dinamičkih karakteristika vozila.

Literatura

1. B. Pikula, I. Filipović, Dž. Bibić, E. Šehić, M. Trobradović, A. Blažević: "Opravdanost korištenja LPG kao alternativnog goriva u lakom dostavnim vozilima firme Coca Cola HBC B-H", Automotive center – centar za vozila d.o.o. Sarajevo, Sarajevo, 2008
2. B. Pikula, I. Filipović, Dž. Bibić; "Influence of Fuel Type on Vehicle Dynamic Characteristics", International Conference Alternative Fuels 2008, Maribor, January 10-11, 2008
3. T. Gillespie: "Fundamentals of Vehicle Dynamics", SAE, ISBN 1-56091-199-9, 1992
4. D. Janković, J. Todorović, G. Ivanović, B. Rakićević: "Teorija kretanja motornih vozila", Mašinski fakultet Beograd, Beograd, 2001
5. M. Mitschke, H. Wallentowitz: "Dynamik der Kraftfahrzeuge", 4. Auflage, Springer, 2004
6. S. Stopar: "Sistem za vbrizgavanje LPG v tekoči fazi", CIMOSOV forum, Koper, 16.11.2007.
7. F. Muštović: "Propan – butan", 2. dopunjeno i izmijenjeno izdanje, IBC Sarajevo, 2006
8. LandiRenzo: "Manuale componenti e installzione, Omegas/GI, GPL 3 – 4 cilindri" i www.landirenzo.it
9. GM and Opel: "Opel Combo brochure", 2003 i www.opel.de

UDK	ključne riječi	key words
621.433/.434	dvogorivni plinski i benzinski motor	dual fuel gas/gasoline engine
665.632	ukapljeni naftni plin UNP	liquefied petroleum gas LPG
665.733.5	motorni benzin	motor gasoline
531.768	mjerjenje ubrzanja	acceleration measurement
621.43.018.7	snaga motora	engine power
621.43.03	uređaj za dovod goriva i punjenje motora	fuel supply and motor charging device
621.43-545	regulacija i vođenje klipnih motora	piston engine tuning and control

Autori

doc. dr. Boran Pikula, dipl. ing.; red. prof. dr. Ivan Filipović, dipl. ing.; doc. dr. Dževad Bibić, dipl. ing.; mr. sc. Murad Džeko, dipl.ing.
 E-mail: pikula@mef.unsa.ba, filipovic@mef.unsa.ba, bibic@mef.unsa.ba, dzeko@mef.unsa.ba

Mašinski fakultet Sarajevo, Odsjek za motore i vozila, Sarajevo, BiH

Primljeno: 22.9.2008.

Prihvaćeno: 04.12.2009.