

Dževad Bibić, Aleš Hribernik, Ivan Filipović, Breda Kegl

ISSN 0350-350X

GOMABN 46, 3, 205-222

Izvorni znanstveni rad / Original scientific paper

UDK 665.3.094.942 : 665.753.4.004.15.001.36

UTJECAJ ALTERNATIVNIH GORIVA NA POKAZATELJE IZGARANJA KOD DIZELOVIH MOTORA

Sažetak

Svakodnevno smanjivanje prirodnih rezervi goriva fosilnog porijekla, kao i neprestani porast troškova njihove eksploatacije uvjetuje sve intenzivnija istraživanja o mogućim alternativnim izvorima energije koji bi s jedne strane smanjili ovisnost o uvozu skupe sirove nafte i njezinih proizvoda, a ujedno doprinijeli smanjenju emisije toksičnih tvari koje se oslobađaju njezinim izgaranjem. Kao rezultat takvog razmišljanja većina razvijenih industrijskih zemalja u Europi nastoji ispuniti prijedlog Europskog parlamenta i Vijeća za promicanje uporabe biogoriva, u kojem se predlaže postupna zamjena benzina i dizelskog goriva u iznosu od 5,75 % od njihovih ukupno prodanih količina s biogorivima, mjereno po njihovom energetsom sadržaju, do 2010. godine.

U okviru ovog rada razmatrana je uporaba biogoriva u dizelovih motorima s unutarnjim izgaranjem namijenjenih za pogon motornih vozila i strojeva. Akcent je stavljen na proces izgaranja tzv. biodizel goriva, kao potpune zamjene klasičnom dizelskom gorivu, te njegovih mješavina s njim, gdje vrlo važnu ulogu ima početak, karakter oslobađanja topline i vrijeme trajanja procesa izgaranja. Prikazani su rezultati proračuna relevantnih parametara procesa izgaranja tako dobivenih goriva, kao i njihova usporedba s odgovarajućim parametrima izgaranja dizelskog goriva fosilnog porijekla. Rezultati provedenih proračuna su verificirani namjenskim ispitivanjima na konkretnom dizelovom motoru.

1. Uvod

Korištenje alternativnih goriva u motorima s unutarnjim izgaranjem ne predstavlja niti novu niti revolucionarnu ideju. Već sedamdesetih godina prošlog stoljeća, s prvom

većom naftnom krizom, počinje se intenzivnije razmišljati o mogućim alternativnim gorivima koja će djelomično ili u potpunosti zamijeniti naftu, odnosno naftne derivate. Očito je motivacija za ovakva razmišljanja u to vrijeme bilo smanjivanje ovisnosti tržišta o osnovnim i najskupljim naftnim derivatima, benzina i dizelskog goriva. Dolaskom osamdesetih godina dvadesetog stoljeća i „buđenjem“ ekološke svijesti čovječanstva, prouzrokovanim značajnim porastom emisije toksičnih tvari iz ispuha motornih vozila, motivacija uvođenja alternativnih goriva proširuje se i na područje mogućnosti smanjenja emisije tzv. zakonski reguliranih emisija, prvenstveno CO, HC, NO_x i dimne vrijednosti. Promocija uvođenja i primjene alternativnih goriva se ograničavala na isticanje prednosti alternativnih goriva s financijskog i ekološkog aspekta, a sve na dobrovoljnoj osnovi. Krajem devedesetih godina dvadesetog stoljeća u okviru EU počinje značajno drugačiji pristup u promoviranju i uvođenju alternativnih goriva, gdje više nije samo važno da gorivo bude alternativno, nego i da ujedno bude porijeklom iz obnovljivih izvora energije.

Tako u 1997. godini, tzv. bijelim papirom (White paper) o obnovljivim izvorima energije, stavlja se za cilj da energija dobivena iz obnovljivih izvora do kraja 2010. godine sudjeluje s 12 % u ukupnoj potrošnji energenata. Za cestovni transportni sektor vrlo važnu i prije svega obvezujuću smjernicu Europskog parlamenta predstavlja smjernica o unapređenju i uporabi biogoriva ili drugih obnovljivih goriva za transportni sektor iz 2003. godine [1]. Naime, u okviru ove smjernice upućuju se sve članice EU da odgovarajućim mjerama osiguraju zamjenu benzina i konvencionalnog dizelskog goriva do kraja 2005. godine s 2 %, odnosno do kraja 2010. godine s 5,75 % goriva iz obnovljivih izvora, mjereno po njihovom energetskom sadržaju. Provođenjem ove smjernice EU očekuje, pored djelomičnog smanjivanja ovisnosti o uvozu skupih fosilnih goriva, smanjenje emisije CO₂ kao stakleničkog plina i drugih reguliranih emisija, te razvoj novih i inovativnih područja s gospodarskog aspekta. Motivi uvođenja biogoriva, kao alternativa konvencionalnim fosilnim gorivima, s političkog i sociološkog aspekta su vrlo jasni, dok s tehničkog aspekta uporaba, u prvom redu biogoriva biljnog i životinjskog porijekla, predstavlja vrlo zahvalno rješenje budući da na motoru s unutarnjim izgaranjem nije potrebno vršiti konstrukcijske izmjene postojećih tehničkih rješenja, već je neophodno tek izvršiti njegovu optimizaciju s obzirom na nešto različite fizičko-kemijske osobine goriva.

2. Biogoriva kao alternativa fosilnim gorivima

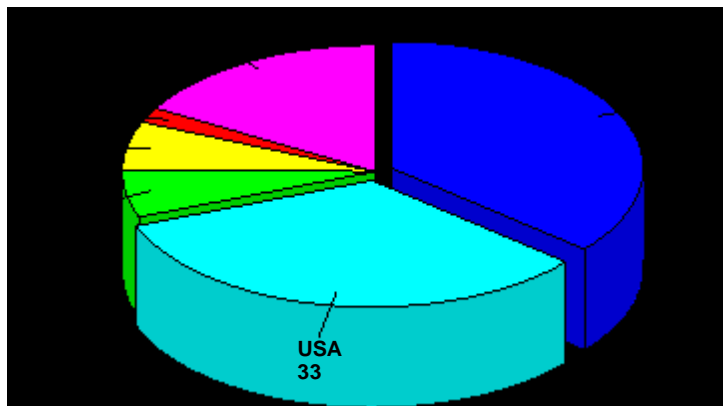
Budući da se motori s unutarnjim izgaranjem međusobno prvenstveno razlikuju s obzirom na način paljenja gorive smjese kao motori sa samopaljenjem i s paljenjem iskrom, jasno je da se i na tržištu biogoriva trebaju razlikovati goriva koja su namijenjena za ove dvije vrste motora. Danas na tržištu prevladavaju dvije vrste goriva, bioetanol i biodizel, za svaku vrstu motora s unutarnjim izgaranjem po jedna, dok su ostale vrste biogoriva vrlo skromno do nimalo u komercijalnom optičaju. Na slici 1 prikazan je pregled biogoriva, koja se danas koriste i koja se u skorijoj budućnosti mogu očekivati [2].

Slika 1: Pregled biogoriva
Figure 1: Overview of biofuels

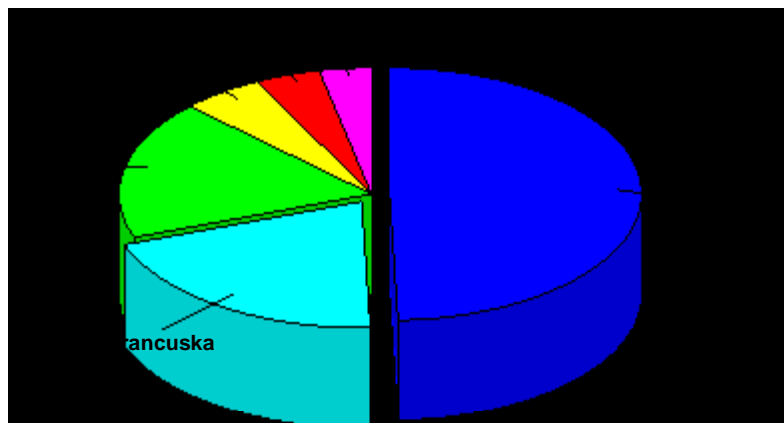
	Goriva za benzinske motore	Goriva za dizelove motore
Danas	Etanol Druga tekuća goriva na osnovi bioetanola:	FAME metil ester masnih kiselina
Uskoro	ETBE (etil tercijarni butil eter) TAME (tercijarni amil metil eter) TAAE (tercijarni amil etil eter)	FAEE etil ester masnih kiselina
Budućnost	Etanol iz celuloze biljaka	BTL (tekuća motorna goriva iz biomase) Obrađena biljna ulja
Daljnja budućnost	Obrađena biljna ulja Nova biogoriva	Obrađena biljna ulja Nova biogoriva

S obzirom na rasprostranjenost uporabe pojedinih goriva ključnu ulogu igraju osnovne sirovine iz kojih se dobivaju predmetna goriva. Tako je na slikama 2 i 3 predstavljen pregled udjela pojedinih zemalja u godišnjoj svjetskoj proizvodnji bioetanola [3] i biodizela [4].

Slika 2: Svjetska proizvodnja bioetanola za 2004. godinu



Slika 3: Svjetska proizvodnja biodizela za 2004. godinu



Kako se i očekuje, proizvodnja bioetanola na američkom kontinentu je dominantna, prije svega zbog prisutnih bogatih prirodnih resursa, te orijentacije tog tržišta na pretežno korištenje benzinskog motora kao pogonskog agregata za cestovna vozila. Stanje u proizvodnji biodizela je drastično različito, te se sa slike 3 jasno vidi da europsko tržište prednjači u proizvodnji i potrošnji ovog energenta. Ovakva slika nije neočekivana ako se zna da veliki broj osobnih vozila, a gotovo isključivo sva komercijalna cestovna vozila, u Europi kao pogonski agregat koriste dizelov motor.

U okviru ovog rada pažnja je dana biodizelu kao gorivu za pogon motora s unutarnjim izgaranjem, te su u tablici 1 uspoređene osnovne fizičko kemijske osobine biodizela i konvencionalnog dizelskog goriva [5].

Tablica: 1 Osnovne fizičko kemijske osobine biodizela i dizelskog goriva

	Dizelsko gorivo prema EN 590	Biodizel prema EN 14214
Gustoća pri 15 °C [kg/m ³]	845	865
Viskoznost pri 40°C [mm ² /s]	2,5	4,3
Donja ogrijevna vrijednost [MJ/kg]	42,6	37,3
Cetanski broj	46	> 49
Sastav		
Maseni udio C	0,860	0,7750
Maseni udio H	0,134	0,1210
Maseni udio S	0,003	0,0001
Maseni udio O	-	0,1040
Stehiometrijski odnos izgaranja	14,5	12,4

3. Karakteristični pokazatelji motora i analiza procesa izgaranja

Za eksperimente je korišten 6-cilindrični, četverotaktni dizelov motor, namijenjen za uporabu kao pogonski agregat u autobusima. U tablici 2 dati su osnovni podaci ispitivanog motora.

Tablica 2: Osnovni podaci ispitivanog motora

Motor	usisni, 4-taktni s MAN postupkom ubrizgavanja goriva
Broj cilindara	6
Promjer i hod klipa	125 mm x 155 mm
Radni volumen	11,413 dm ³
Stupanj stlačivanja	18
Statički kut predubrizgavanja	23° prije GMT
Nazivna snaga	160kW/2200 min ⁻¹
Moment	775 Nm/1400 min ⁻¹

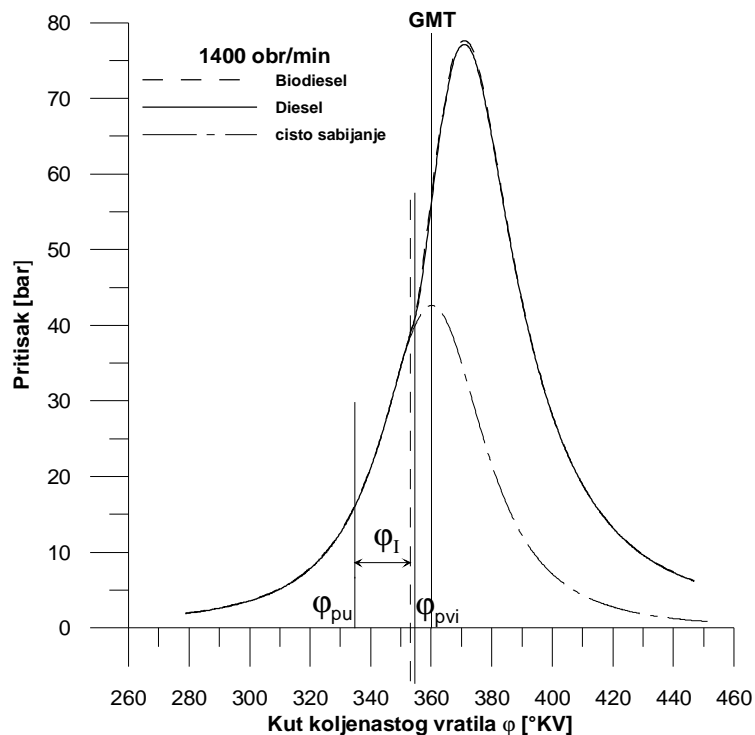
Osim pokazatelja prikazanih u tablici 2 izvršeno je snimanje i ostalih relevantnih pokazatelja, kao što su: promjena tlaka u cilindru motora, maksimalni tlak u motoru, protok usisanog zraka, protok vode za hlađenje, sastav ispušnih plinova, potrošnja goriva i sl. Na osnovi snimljenih pokazatelja motora, konstrukcijskih karakteristika i osobina goriva (gustoća, ogrijevna vrijednost i sl.) izvršen je proračun nekih pokazatelja (stupanj punjenja, ekvivalentni odnos zraka, koeficijent zaostalih plinova, toplinska ravnoteža motora, itd.). Snimanje indikatorskih dijagrama izvršeno je zadržavajući statički kut predubrizgavanja, za slučaj korištenja oba goriva. Primjer snimljenog dijagrama tlaka u motoru, i pri korištenju dizelskog goriva i biodizela, prikazan je na slici 4. Na istoj slici prikazano je razdoblje pritajenog izgaranja (φ_i), kut predubrizgavanja (φ_{pu}), početak vidljivog izgaranja (φ_{pvi}).

Na slici 4 prikazan je dijagram indiciranog tlaka za broj okretaja koji odgovara maksimalnom momentu pri punom opterećenju motora. Razlike tlakova u dva ekstremna slučaja, korištenje biodizela odnosno dizelskog goriva, nisu velike, a isto tako mogu se primijetiti male, ali određene razlike u kutnom intervalu trajanja pritajenog izgaranja. Kod biodizela kutni interval pritajenog izgaranja je nešto manji, što se može povezati s nešto većim cetanskim brojem biodizela u odnosu na dizelsko gorivo, kao i većom viskoznošću biodizela te se samim tim i proces ubrizgavanja goriva odvija drukčije u odnosu na dizelsko gorivo.

Povećanjem broja okretaja motora i približavanjem režimu maksimalne snage, razlike u indiciranim tlakovima u cilindru motora između slučajeva korištenja čistog biodizela odnosno dizelskog goriva su sve manje.

Koristeći sve spomenute pokazatelje motora, stvoreni su preduvjeti za analizu karakterističnih pokazatelja procesa izgaranja u motoru.

Slika 4: Indicirani tlak u motoru s unutarnjim izgaranjem s biodizelom i dizelskim gorivom na režimu maksimalnog momenta



3.1 Pokazatelji procesa izgaranja

Optimalan rad motora prvenstveno ovisi o podešenosti pokazatelja dobave goriva, njegovog miješanja sa zrakom i početka paljenja smjese kao i toka izgaranja. Da bi se ovi pokazatelji definirali pravilno, potrebno je poznavanje pokazatelja procesa izgaranja goriva u motoru. Osnovni pokazatelji procesa izgaranja su:

- maksimalni tlak izgaranja (p_{max}) i maksimalna temperatura ciklusa (T_{max}),
- kut početka vidljivog izgaranja u odnosu na GMT (φ_{pvi}),
- kutni interval trajanja izgaranja (φ_{ti}),
- brzina oslobađanja topline (karakteristika izgaranja) ($\frac{dQ_{akt}}{d\varphi}$) i
- priraštaj ukupne količine razvijene topline (Q_{akt}).

Maksimalni tlak izgaranja kao i početak vidljivog izgaranja određuju se na osnovi snimljenog dijagrama tlaka u motoru i dijagrama tlaka kompresije. Razdoblje trajanja izgaranja ne može se odrediti direktno na osnovi rezultata mjerenja. Ono se definira preko karakteristike izgaranja koja se dobiva obradom indikatorskog dijagrama tlaka. Brzina oslobađanja topline (karakteristika izgaranja) može se izračunati korištenjem jednozonskog modela, kao [6, 7, 9]:

$$\frac{dQ_{akt}}{d\varphi} = \frac{\frac{dQ_c}{d\varphi} + p \frac{dV}{d\varphi} + \frac{1}{R} \frac{\partial u}{\partial T} \left[p \frac{dV}{d\varphi} + V \frac{dp}{d\varphi} - mT \frac{\partial R}{\partial p} \frac{dp}{d\varphi} + m \frac{\partial u}{\partial p} \frac{dp}{d\varphi} \right]}{1 + \frac{T}{R} \frac{\partial R}{\partial T}}, \quad (1)$$

$$1 + \left[\frac{\partial u}{\partial T} \frac{T}{1 + \frac{T}{R} \frac{\partial R}{\partial T}} - u \right] \frac{1}{H_g} - c_\alpha m \left[\frac{\partial u}{\partial \alpha} - \frac{\partial u}{\partial T} \frac{\partial R}{\partial \alpha} \frac{T}{R} \frac{1}{1 + \frac{T}{R} \frac{\partial R}{\partial T}} \right],$$

gdje su:

- Q_c gubitak topline,
 u specifična unutarnja energija,
 R plinska konstanta,
 T temperatura,
 H_g donja ogrijevna vrijednost,
 α koeficijent viška zraka,
 $c_\alpha = - \frac{m_g H_g [\alpha_0^2 (1 + \gamma) + \alpha_0 (\mu_0 - 1)] (\alpha_0 + \mu_0 - 1)}{[\alpha_0 \gamma H_g m_g + (\alpha_0 + \mu_0 - 1) Q_{akt}]^2}$,
 γ koeficijent zaostalih plinova,
 μ_0 teoretski koeficijent molekularne promjene,
 m_g masa goriva.

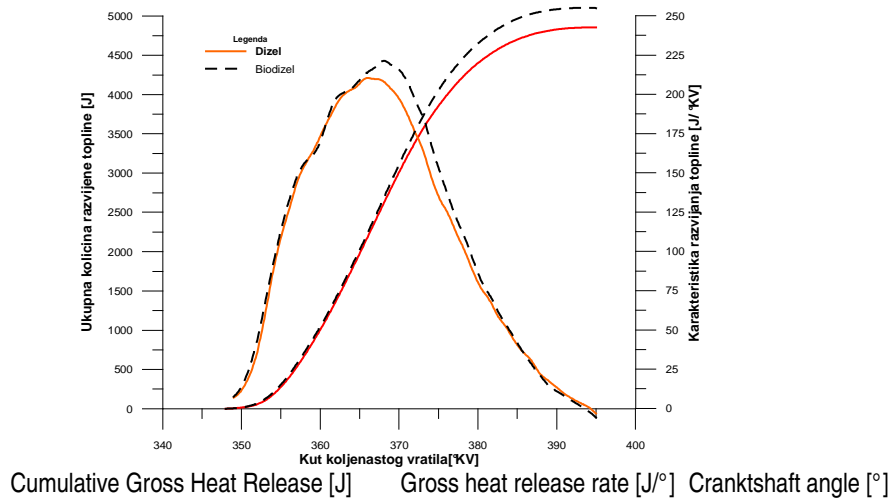
S obzirom na karakter toka snimljenog tlaka u motoru, bilo je neophodno izvršiti njegovo izravnavanje [8] u zoni pojačanih oscilacija, kako bi se dobile uprosječene vrijednosti Q_{akt} i $dQ_{akt}/d\varphi$.

Sve ostale veličine kao što su:

- trenutačni obujam u cilindru $V(\varphi)$,
- masa radne tvari $m(\varphi)$,
- plinska konstanta $R(\varphi)$, itd.

definirani su promjenom kuta okretanja koljenastog vratila (φ) poštujući geometrijske veličine klipnog mehanizma, sastav radne tvari u cilindru, sastav plinova izgaranja u cilindru i sl. [6, 7, 9]. Primjer izračunatih karakterističnih veličina, za oba razmatrana goriva pri režimu nazivne snage, prikazan je na slici 5.

Slika 5: Karakteristika oslobađanja topline i prirast ukupno oslobođene topline



Dobiveni rezultati na slici 5 upućuju da su odstupanja karakteristika oslobađanja topline za dizelsko gorivo i biodizel relativno mala za dati režim rada motora. Ovdje su prikazani rezultati pokazatelja izgaranja za samo jedan režim zbog prostora, a zaključni komentar je donesen na osnovi većeg broja dobivenih rezultata na različitim režimima rada motora.

4. Zaključak

U radu su dati usporedni rezultati osnovnih pokazatelja procesa izgaranja kod dizelovog motora koji kao gorivo koristi dizelsko gorivo i biodizel. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti:

- Maksimalni tlak i maksimalna temperatura ciklusa su pri korištenju razmatranih goriva vrlo bliski, odnosno za biodizel nešto veći.
- Potrošnja biodizelskog goriva, zbog niže ogrjevne vrijednosti i zadržavanja približno jednakih izlaznih pokazatelja motora s unutarnjim izgaranjem za oba slučaja je malo povećana.
- Kut pritajenog izgaranja je manji pri korištenju biodizela.
- Kutni interval izgaranja ostaje nepromijenjen.
- Brzina oslobađanja topline je približno jednaka za oba goriva, s tim što su krajnje vrijednosti za biodizel nešto veće.

Svi ovi pokazatelji važe za istu učinkovitost motora, približno jednaku izlaznu snagu, uz napomenu da je zadržan isti kut predubrizgavanja goriva, čega je posljedica neoptimiziran rad motora pri korištenju biodizelskog goriva. Učinkovitost procesa gledano preko izlazne snage, u odnosu na unesenu energiju u gorivu, zadržava se samom činjenicom da je izlazna snaga $P_e \propto \int p dV$, a brzina izgaranja je dovoljno

velika da se u tom razdoblju ne pogoršavaju uvjeti izgaranja (povećan dim, CO, HC, itd.), dok je zbog nešto većih vršnih temperatura izgaranja emisija NO_x povećana u odnosu na korištenje konvencionalnog dizelskog goriva. Ovo sve upućuje na zaključak, da se poznavanjem pokazatelja izgaranja biodizelskog goriva na motoru mogu podesiti optimalni pokazatelji koji osiguravaju najbolju učinkovitost motora uz vrlo nisku emisiju toksičnih tvari.

UDK	ključne riječi	key words
665.3.094.942	biodizelsko gorivo, metilni esteri masnih kiseline	biodiesel fuel, fatty acids methyl ester (FAME)□
665.753.4	dizelsko gorivo	diesel fuel
.004.15	gledište djelotvornosti	performance viewpoint
.001.36	gledište usporedbe	comparison viewpoint

Literatura

- [1] Richtlinie 2003/30/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Mai 2003 zur Förderung der Verwendung von Biokraftstoffen oder anderen erneubaren Kraftstoffen im Verkehrssektor
- [2] Final draft Report of the Biofuels Research Advisory Council, Biofuels in the European Union – a Vision for 2030 nad Beyond , 2006
- [3] MARTINOT E., Renewables 2005 – Global Status Report, Worldwatch Institute, 2005
- [4] F. O. Licht's World Ethanol and Biofuels Report, Biofuels 2004
- [5] HRIBERNIK A., Biodiesel as a Fuel and its Influence to the Emission of Harmful Substances and Combustion Process in a Diesel Engine with a Direct Fuel Injection, Innovative Automotive Technology – IAT '05, Bled, 21st – 22nd April 2005, R Slovenia
- [6] JANKOV R., Matematičko modeliranje strujno-termodinamičkih procesa i pogonskih karakteristika dizel-motora, kvazistacionarni modeli, I deo osnovi, Naučna knjiga Beograd, 1984. god. Beograd
- [7] HEYWOOD J. B., Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, NY, 1988
- [7] OSTROVSKI S., Primenenie kubičeskijh splainov pri interpolaciji indikatornijh diagramm, Dvigatele stroenie, br. 4, Lenjingrad, 1984. g.
- [8] BARBA C., Erarbeitung von Verbrennungskennwerten aus Indizierdaten zur verbesserten Prognose und rechnerischen Simulation des Verbrennungsablaufes bei Pkw-DE-Dieselmotoren mit Common-Rail-Einspritzung, Diss. ETH Nr. 14276, Zürich 2001

Autori

mr. sc. Dževad Bibić, prof. dr. sc. Ivan Filipović
 Mašinski fakultet Sarajevo, Odsjek za motore i vozila, Vilsonovo šetalište 9, 71 000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, tel./fax. +387 33 650 841; e-mail: bibic@mef.ba, fillipovic@mef.ba
 izv. prof. dr. sc. Aleš Hribernik, izv. prof. dr. sc. Breda Kegl
 Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija, e-mail: ales.hribernik@uni-mb.si, breda.kegl@uni-mb.si

Primljeno

20.6.2006.