

## EKOLOŠKE KARAKTERISTIKE KLASIČNIH I SAVREMENIH DIZEL MOTORA

*Mašinski fakultet u Kragujevcu*

**REZIME:** Autori su analizirali mogućnosti za poboljšanje ekoloških karakteristika savremenih dizel motora.

Ograničenja emisije produkata sagorevanja dizel motora, zahtevaju povećanje pritiska ubrizgavanja i broja otvora na brizgaču, kroz koje se ubrizgava dizel gorivo. Ovo je navelo konstruktore na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu da sisteme za ubrizgavanje, koji se koriste na dizel motorima većih snaga, kao što su na primer akumulatorski sistem za ubrizgavanje ili sistem pumpa-brizgač, usavrše i prilagode za dizel motore srednjih snaga, koji se koriste i na vozilima.

Na prototipu motora sa ugrađenim sistemom neposrednog, visoko-pritisnog ubrizgavanja izvršen je veliki broj ispitivanja. U radu smo prikazali snimljene indikatorske dijagrame, čijom obradom su dobijeni odgovarajući zakoni sagorevanja.

**Ključne reči:** Dizel motor, ekologija, sistem za ubrizgavanje

**ABSTRACT:** The authors discuss the possibilities for increase ecological characteristic of modern Diesel engine.

Restrictions of the Diesel engines exhaust gasses emission require increase of the injection pressure and number of openings on the injector, through which the fuel is being injected in the combustion chamber. This has led the designers at the Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac of the injection systems, which were used in Diesel engines of higher power, as is the accumulator injection system, or the unit pump-injector system, to improve them and adapt to Diesel engines of the mid-size power, which use in cars.

At the engine prototype included the direct high-pressure fuel injection system the indicator's diagrams were recorded, and by their elaboration the combustion rate was performed.

**Key words:** Diesel engine, ecology, injection system

### UVOD

Već je dobro poznato da su motorna vozila izvor aerzagadenja koje, zbog toksičnih komponenti, direktno šteti ljudskom zdravlju.

Za sagorevanje 1kg goriva naftnog porekla potrebno je 15kg vazduha ili 3.5kg kiseonika što znači da sam proces narušava ekološki bilans u atmosferi. Godišnje samo motori sa unutrašnjim sagorevanjem angažuju skoro 4 milijarde tona kiseonika iz atmosfere (*više od jedne generacije ljudi*).

Približno 98% produkata sagorevanja su neškodljive materije: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, i O<sub>2</sub>, dok ostali deo čine hemijska jedinjenja koja se klasifikuju kao opasna po živi svet: CO, HC, NO<sub>x</sub> i za dizel motore karakteristična pojava čestica.

Velike količine gasova (CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O; približno 4.5kg/kg goriva), dovode do promene klime na Planeti, i povećanja globalnog zagrevanja (*efekat staklene bašte*) [1,5].

Dizel motori su znatno ekonomičniji od benzinskih i predstavljaju nezamenljive pogonske agregate industrijskih i radnih mašina, teških kamiona, autobusa, traktora i td. Da bi dizel motori zadovoljili ekološke propise, pre svega u pogledu emisije NO<sub>x</sub> i čestica, neophodna je primena novih tehnologija koje su još uvek nedovoljno usavršene i skuplje od istih koje se primenjuju na benzinskim motorima, koji dominiraju kao pogonski agregat putničkih vozila. Međutim, za realizaciju propisa o dozvoljenoj

potrošnji goriva i emisiji CO<sub>2</sub> neophodno je raditi i na vozilskim varijantama dizel motora [2,3,6,7,8].

Veća ekonomičnost dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem goriva (DU), uslovljena kvalitetnijim sagorevanjem, manjim gubicima toplote i manjim gubicima na prestrujavanje punjenja u komori je potpuno eliminisala iz upotrebe komorne motore.

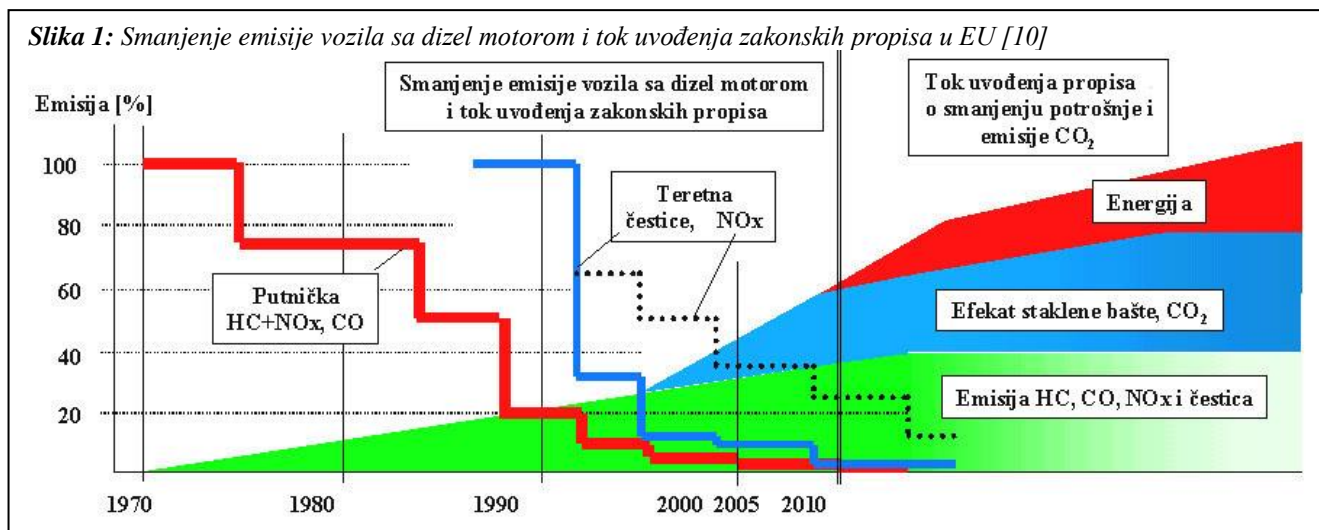
### EKOLOŠKI PROPISI

U Evropi je 1971.god. donet propis ECE 15.00 za emisiju putničkih i lakih teretnih vozila. Danas regulativu određuje EU preko EURO-I do EURO-V [4,9].

Za teretna vozila sa dizel motorom, standard EURO-III zahteva nove test cikluse: stacionarni, ESC (*European Stationary Cycle*) i ciklus sa prelaznim režimima, ETC (*European Transient Cycle*). Dimnost produkata sagorevanja se meri po ciklusu za prihvatanje opterećenja, ELR (*European Load Response*). Propisan test ciklus za putnička vozila je ECE+EUDC, poznat kao MVEG-A [9].

Smanjenje emisije i potrošnje putničkih i teretnih vozila sa dizel motorom, kao i tok uvođenja zakonskih propisa u EU, prikazan je na *slici 1*.

U odnosu na 1970.god. kada su donete prve zakonske regulative, granice za standard EURO-IV, koji će važiti za nova vozila od 2005.god. su manje za približno 90%.



## SMANJENJE EMISIJE DIZEL MOTORA

Prema firmi VW [11], za smanjenje emisije vozila sa dizel motorom, realno je primeniti sledeće tehnologije:

- Optimiranje procesa sagorevanja.
- Povećanje stepena iskorišćenja oksidacionog katalizatora
- Smanjenje sadržaja sumpora u gorivu.
- Ugradnja dodatnog filtra čestica.
- Katalizatori za NOx.

Neke od **novih tehnologija** koje treba primeniti, da bi savremeni dizel motori zadovolji propise o dozvoljenoj emisiji i potrošnji su sledeće [3,5,6,7,8,11]:

- Visoko-pritisno ubrizgavanje dizel goriva korišćenjem: rotacionih pumpi, akumulatorskog sistema za ubrizgavanje (*common rail*) i sistema pumpa-brizgač.
- Elektronska kontrola ubrizgavanja goriva (*pilot ubrizgavanjem inicijalne količine dizel goriva za paljenje pre osnovne smanjuje se brutalnost sagorevanja, emisija NOx i potrošnja*).
- Broj mlaznica iz brizgača za gorivo treba da bude preko 8 i težiti što manjem prečniku otvora u brizgaču, tako da se u kombinaciji sa visoko-pritisnim ubrizgavanjem smanjuje prečnik kapljica u mlazu goriva, što ima za posledicu ravnomerno obrazovanje smeše i bolje iskorišćenje energije goriva.
- 4 tj. više od 2 ventila po cilindru, tako da je moguće centralno postavljanje brizgača, bolja kontrola procesa sagorevanja i bolja raspodela spreja goriva.
- Turbo-punjenje sa međuhlađenjem sabijenog vazduha i promenljivoj geometrijom turbo grupa, koje koriguje nedostatke performansi dizel motora pa ih približava benzinskim motorima.
- Varijabilni sistemi na vozilu: varijabilni usisni sistemi, varijabilni pogon pomoćnih uređaja, pumpi, ventilatora, sa obaveznom primenom varijabilnog stepena kompresije.
- Sistemi za katalitičku obradu produkata sagorevanja u kombinaciji sa hvatačima čestica, oksidacionim i NOx katalizatorima, tipa SCR i CRT/DPF (*Selective Catalytic Reduction; Continuously Regenerative Traps i Diesel Particulate Filters*).

- Koristiti dizel gorivo sa smanjenim sadržajem sumpora ( $S < 10 \text{ppm}$ ), i adaptirati motore za rad sa alternativnim (*ekološki čistijim*) gorivima.
- Primeniti nove materijale sa boljim tribološkim svojstvima, koji su lakši i izdržljiviji, tako da dopuštaju povećanje maksimalnog pritiska i smanjenje trenja.
- Hvatači uljnih para, čiji je zadatak da kondenzuju uljne pare i tečno ulje vrata u karter. U.S.A firma *Delphy Energy and Engine Management Systems* je razvila senzor stanja ulja u motoru. Indirektnim merenjem viskoznosti i kiselinog broja registruje se degradacija ulja. Na osnovu te informacije određuje se trenutak zamene motornog ulja.
- Akumuliranje neiskorišćene toplote sadržane u sistemu za hlađenje i produktima sagorevanja i upotreba za zagrevanje motora pre startovanja.

Osim visokog pritiska ubrizgavanja dizel goriva, od opreme dizel motora se zahteva preciznost i pouzdanost. Pri visoko-pritisnom ubrizgavanju gorivo sadrži višak energije, pa novi motori imaju blaže zahteve prema vrtloženju u toku usisavanja.

**Tabela 1: Karakteristike pumpi za ubrizgavanje dizel goriva firme BOSCH [6,7]**

	Pritisak u brizgaču (bar)	Oblast primene	Snaga kW/cil.
<b>Distribuciona (VE, VR)</b>	~1550/1850	Putnička i teretna vozila	≥45
<b>Linijska (PE)</b>	~1150	Teretna voz. i stac. motori	≥70
<b>Pumpa-brizgač (PF)</b>	~1500	Brodovi i radne mašine	≥600
<b>Pumpa-brizgač (UIS/UPS)*</b>	~1800/2000	Putnička i teretna vozila	≥70
<b>Akumulatorski sistem ubrizg. (Common Rail)</b>	~1350/1400	Putnička i teretna vozila, brodovi i radne mašine	≥50

\* -UIS/UPS (*Unit Injector System/Unit Pump System*)

U *tabeli 1*, su prikazane vrednosti pritiska ubrizgavanja (*na izlasku iz brizgača*), nekih verzija pumpi za ubrizgavanje firme BOSCH, zavisno od oblasti primene, kao i ostvarena snaga (*kW/cilindru*).

Sistemi ubrizgavanja tipa UIS, UPS i Common Rail imaju mogućnost pilot ubrizgavanja, dok se sekundarno poboljšano ubrizgavanje primenjuje u okviru Common Rail tehnologije. Ubrizgavanje male pilot količine goriva pre osnovne ( $1...4mm^3$ ) počinje oko  $90^\circ$  ugla KV pre SMT. Sekundarnim ubrizgavanjem rasprašenog dizel goriva u toku takta ekspanzije ili izduvavanja,  $200^\circ$  ugla KV posle SMT, uvodi se precizno odmerena količina goriva u produkte sagorevanja. Ubrizgano gorivo ne sagoreva, već isparava u toploti produkata sagorevanja. Recirkulacijom se gorivo vraća na sagorevanje i ima isti efekat kao i pilot ubrizgavanje. Rezultat je ukupno smanjenje emisije NOx.

Recirkulacija produkata sagorevanja je efektivna mera za smanjenje emisije NOx, bez značajnijeg povećanja emisije čestica. Recirkulacijom preko 40% od zapremine usisanog vazduha može doći do povećanja emisije čestica, CO, HC, kao i veće potrošnje goriva zbog nedostatka kiseonika u komori za sagorevanje.

Kvalitetno rasprašivanje goriva je obezbeđeno visokopritisnim ubrizgavanjem, optimalnom konstrukcijom komore za sagorevanje i pravilnom geometrijom otvora brizgača. Efekat je smanjenje emisije čestica i NOx.

Smanjenju emisije čestica i HC potpomaže još i pravilno podešena količina ubrizganog goriva, saglasno količini usisanog vazduha. Obezbeđen je neophodan višak vazduha sa kojim radi dizel motor od najmanje 10...40% odnosno ( $\lambda=1.1...1.4$ ).

Motor optimiran u pogledu smanjenja emisije NOx ima povećanu emisiju čestica i obrnuto, tako da je pri optimiranju motora, neophodno naći odgovarajući kompromis na bazi NOx – čestice.

Kod modernih sistema za ubrizgavanje opremljenih sa EDC (*Electronic Diesel Control*), početak ubrizgavanja je promenljiv. Kontrola početka ubrizgavanja ili BIP kontrola (*Beginning of Injection Period*), kontroliše ugao početka ubrizgavanja sa tačnošću od  $\pm 1^\circ$  ugla KV.

Novi brizgači za gorivo su veoma pouzdani i mogu da izdrže pritisak od 2000bar i temperaturu od  $3000^\circ C$ , kao i učestale promene ovih veličina. Obično se ubrizgava ( $1...350mm^3$ ) goriva, u trajanju od ( $1...2ms$ ). Zapremina ispod vrha igle brizgača, (*kada je brizgač zatvoren*) je smanjena, a samim tim i količina zaostalog goriva ispod vrha igle, koja može da ispari, dospe u cilindar motora i nepotpuno sagori, povećavajući emisiju HC [6,7].

## EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

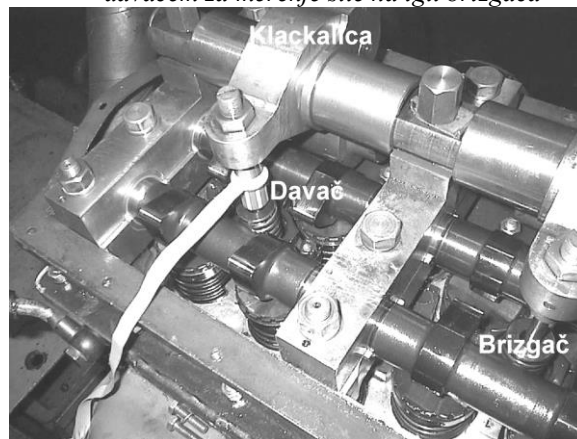
Grupa konstruktora na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu je uradila prototip domaćeg dizel motora srednjih snaga. Motor je adaptiran za sistem neposrednog visoko-pritisnog ubrizgavanja dizel goriva, pumpa-brizgač, firme CUMMINS tipa PT, koji radi bez elektronske kontrole i koji je analiziran u okviru rada [2,3].

PT sistem za ubrizgavanje goriva ima ekonomske i operativne prednosti dokazane dugim periodom korišćenja.

Ovaj sistem ubrizgavanja osim promenljivog ugla početka ubrizgavanja karakteriše i činjenica da se u prostor za sagorevanje ubrizgava dvofazna smeša. To je emulzija goriva i punjenja formirana ispod vrha igle brizgača u toku takta sabijanja, kada punjenje iz cilindra ulazi kroz otvore u brizgaču. Emulzija povoljno utiče na pripremu smeše kao i na sam proces sagorevanja.

Urađen je matematički model sistema pumpa-brizgač firme CUMMINS tipa PT i program za izračunavanje parametara ubrizgavanja prilagođen za personalni računar, da bi se izvršila teorijska analiza ovog sistema sa visokopritisnim ubrizgavanjem dizel goriva.

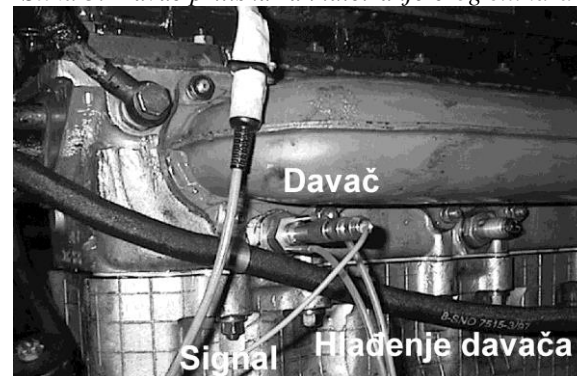
*Slika 2: Fotografija glave rekonstruisanog motora sa davačem za merenje sile na igli brizgača*



Fotografija detalja glave rekonstruisanog motora je prikazana na *slici 2*. Sklop pumpa-brizgač dobija pogon od posebnog vratila preko klackalica, i centralno je postavljen u odnosu na cilindar. Takođe je primenjena tehnologija 4 ventila po cilindru sa nadpunjenjem.

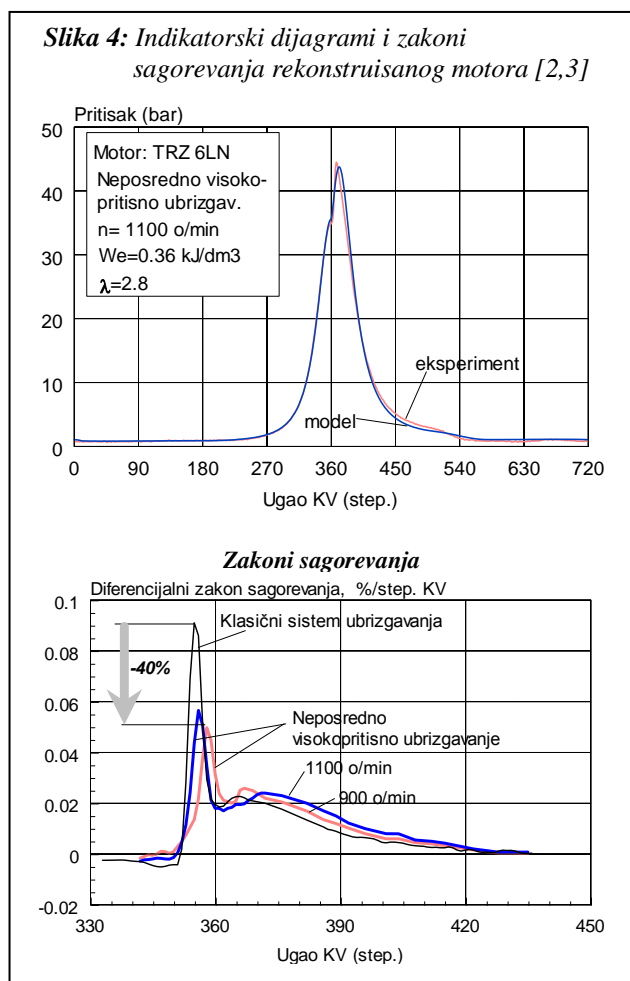
## ANALIZA RADNOG PROCESA MOTORA

*Slika 3: Davač pritiska za indiciranje 6-og cilindra*



Fotografija eksperimentalnog motora TRZ 6LN sa ugrađenim, vodom hlađenim piezoelektričnim davačem pritiska je prikazana na *slici 3*. Posle pojačanja signal se odvodi u A/D konvertor i računar.

Nakon snimanja indikatorskih dijagrama vršena je njihova obrada. Rađena je statistička analiza serije ciklusa, računat je osrednji ciklus a zatim je određivan zakon sagorevanja u osrednjenom ciklusu.



Na *slici 4*, su prikazani indikatorski dijagrami i zakoni sagorevanja rekonstruisanog motora, kao i odgovarajući ciklus dobijen matematičkim modelom.

Primenjeni sistem neposrednog visoko-pritisnog ubrizgavanja dovodi do bitnog (*oko 40%*, *slika 4*), smanjenja maksimalne vrednosti diferencijalnog zakona sagorevanja.

## ZAKLJUČCI

- Prelazak na optimalne konstrukcije dizel motora i njegove opreme uz pritiske ubrizgavanja od 1800bar i više, zahteva novu koncepciju sistema za ubrizgavanje i primenu novih tehnologija. U ovom radu je ispitan sistem pumpa-brizgač.
- Ekstremno visoki pritisci ubrizgavanja, uz povećan broj otvora na pumpi-brizgaču, emulgovanje goriva u pumpi-brizgaču i efekat rasprašivanja sabijenog vazduha posle ubrizgavanja emulzije u cilindar motora, garantuju kvalitetnije mešanje goriva sa vazduhom i ekonomičnije iskorišćenje ubrizganog goriva.

- Da bi se željeni tok zakona i pritiska ubrizgavanja ostvario u radnom polju motora, mehaničko potiskivanje igle pumpe-brizgača, treba korigovati pomoću elektronike.
- Ovaj sistem ubrizgavanja ima efekat na zakon sagorevanja kao aditivi za povećanje cetanskog broja. Maksimalna vrednost diferencijalnog zakona sagorevanja je smanjena za približno 40%. Manja je količina goriva koja sagori u prvom periodu, nekontrolisanog sagorevanja. Zbog toga dolazi do smanjenja maksimalnih temperatura u cilindru motora, što se reflektuje kroz smanjenje emisije NOx. Količina goriva koja sagori u toku difuznog sagorevanja je veća, temperature u ovoj fazi sagorevanja i širenja su više, a to se preslikava u nižu emisiju dima i čestica.
- Smanjenje količine goriva koje sagori u periodu nekontrolisanog sagorevanja, ima za posledicu niži nivo buke motora.

## ZAHVALA

U ovom radu su prikazani rezultati istraživanja u toku realizacije projekta **“Ekološka i tribološka optimizacija domaćih motora za vozila”** koji je finansijski pomoglo Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] Veinović S., Pešić R., Petković S.: “Pogonski materijali MVM”, Banja Luka-Kragujevac, 2000.god., knjiga od 365 strana.
- [2] Pavlović R., Pešić R.: “Primena neposrednog visokopritisnog ubrizgavanja goriva kod dizel motora”, Monografija: Istraživanja u oblasti motora sus, Mašinski fakultet u Kragujevcu 2000.god., strane 353-385.
- [3] Pavlović R.: “Teorijsko-eksperimentalna analiza neposrednog visoko-pritisnog ubrizgavanja goriva u dizel motor”, Magistarski rad, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1998.god.
- [4] Petrović S., Popović V.: “Razvoj evropskih propisa o izduvnoj emisiji motornih vozila”, časopis Zastava br. 36, Kragujevac, jun 2001.god., strane 22-26.
- [5] Pešić R.: “Automobilski oto motori sa minimalnom potrošnjom”, časopis Mobility & Vehicle Mechanics, Monografija, Mašinski fakultet u Kragujevcu, 1994.god.
- [6] BOSCH Technical Instruction: “Diesel Accumulator Fuel-Injection System: Common Rail”, Stuttgart 1999.god.
- [7] BOSCH Technical Instruction: “Diesel Fuel-Injection Systems: Unit Injector System/Unit Pump System”, Stuttgart 2000.god.
- [8] Boulouchos K., Stelber H., Schubiger R., Eberle M., Lutz T.: “Optimierung von Arbeits-und Brennverfahren für größere Dieselmotoren mit Common-Rail-Einspritzung”, časopis MTZ, maj 2000.god., st. 336-345.
- [9] www.dieselnet.com/standards
- [10] EUCAR, Presentation to OICA, Feb. 20. 2002.god.
- [11] ACEA, Report on small particle emissions from passenger cars, 1999.god.

*Izdavač:* Mašinski fakultet u Kragujevcu  
YU-34000 Kragujevac, ul. Sestre Janjić broj 6

*Za izdavača:* Prof. dr Radovan Slavković - dekan

*Urednici:* Ac. prof. dr Miroslav Demić  
Prof. dr Radivoje Pešić

*Korektura:* Mr Radomir Pavlović

*Tehnička priprema,  
kompjuterski prelom i korice:* Prof. dr Radivoje Pešić

*Štampa:* GRUPA ZASTAVA VOZILA a.d.,  
PJ Agencija za grafički dizajn i štampu, Kragujevac

ISBN 86-80581-43-7

*Godina izdanja:* 2002. godine

*Tiraž:* 250 primeraka

CIP - Katalogizacija u publikaciji  
Narodna biblioteka Srbije, Beograd

629.3 (063) (082)  
629.11 (063) (082)  
662.75/.76 (063) (082)

**МЕЂУНАРОДНИ научни симпозијум Моторна возила и мотори (12 ;  
2002 ; Кragујевац )**

Motorna vozila i motori : zbornik radova = Motor Vehicles and Engines :  
proceedings / XII međunarodni naučni simpozijum Motorna vozila i motori  
MVM 2002 = [XII] International Scientific Meeting Motor Vehicles and  
Engines, 7-9. oktobar, 2002., Kragujevac : [urednici Miroslav Demić, Radivoje  
Pešić]. - Kragujevac : Mašinski fakultet, 2002 (Kragujevac : Grupa zastava  
vozila, Agencija za grafički dizajn i štampu). - 305 str. : ilustr. ; 24 cm

Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 250. - Abstracts. - Bibliografija uz sve  
radove.

ISBN 86-80581-43-7

a) Моторна возила - Зборници b) Мотори са унутрашњим сагоревањем -  
Зборници c) Горива - Зборници  
COBISS-ID 100972044

**© Preštampavanje i umnožavanje zabranjeno i u celini i u delovima**

Izdavanje ovog zbornika radova pomogli su:

*Ministarstvo za nauku, tehnologije i razvoj Republike Srbije,  
Savezni sekretarijat za razvoj i nauku,  
Zastava automobili a.d.,  
Zastava automobili rezervni delovi,  
NIS Rafinerija nafte Pančevo,  
Rafinerija ulja Modriča,  
Centar za TIV Mašinskog fakulteta u Kragujevcu,*