Ljubiša Marković,
dipl. inž.
Dr Predrag Petrović,
dipl. inž.
Industrija motora Rakovica,
Beograd

RAZVOJ DIZEL MOTORA NISKE EMISIJE IZDUVNIH GASOVA ZA PRIMENU U MOBILNIM MAŠINAMA

UDC: 621.436.1.001

Rezime:

Zadovoljenje sadašnjih, kao i budućih standarda emisije izduvnih gasova dizel motora, predstavlja primarni zadatak njihovog razvoja. Sa tog aspekta, u Institutu industrije motora Rakovica, zajedno sa Institutom za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu, realizovana su istraživanja i razvoj nove verzije motora TDM33. Ugradnjom adekvatnog turbokompresora, katalizatora za naknadni tretman izduvnih gasova i optimizacijom sistema ubrizgavanja postignuti su veoma značajni rezultati koji zadovoljavaju ekološke standarde u pogledu emisije izduvnih gasova, kao i utvrđivanju smernica ka sličnim poboljšanjima drugih motora. Uslovi i metodologija, kao i deo rezultata ispitivanja, prikazani su u ovom radu.

Ključne reči: dizel motor, emisija izduvnih gasova.

DEVELOPMENT OF THE DIESEL ENGINE WITH LOW EMISSION OF EXHAUST GASES FOR THE APPLICATION IN MOBILE MACHINES

Summary:

The primary demand in the Diesel engine development is to satisfy current as well as future standards concerning Diesel engine exhaust gases. From that viewpoint, the researches and the development of a new version of the TDM33 engine were realized in the Institute of Engine Industry, Rakovica and the Institute for engines, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade. By building in an appropriate turbocompressor and a catalyst for the subsequent treatment of exhaust gases and by optimizing the injection system, we obtained very significant results which satisfy ecological standards concerning exhaust gases emission and offer help for similar improvements in other engines. Conditions, methodology and a part of test results are presented in the paper.

Key words: Diesel engine, emission of exhaust gases.

Uvod

Sagledavajući uticaj motornih vozila i drugih saobraćajnih sredstava na životnu sredinu, može se uočiti da glavni negativni uticaj dolazi od emisije izduvnih gasova. Osnovna ispitivanja dizel motora preduzimaju se radi smanjenja emisije izduvnih gasova, kao i

poboljšanja energetske karakteristika. Novijeg je datuma propis ECE R96 koji reguliše izduvnu emisiju dizel motora namenjenih ugradnji u poljoprivredne i šumarske mašine. Granice koje su sadržane propisom veoma su stroge i odnose se na motore snage iznad 37 kW. Toksični parametri CO, HC, NO_x i čestice u izduvnim gasovi-

ma moraju biti u skladu sa standardom, tako da su inicirane aktivnosti u poboljšanju postojećih i razvoju novih dizel motora.

Imajući sve to u vidu, Institut IMR već duže vreme radi na razvoju novih dizel motora koji će zadovoljavati pomenute ekološke standarde. Razvijen je turbopunjeni motor TDM33 kojim je ispunjen navedeni propis.

Istraživanja je sufinansiralo Ministarstvo za nauku i tehnologiju [7].

Razvoj motora TDM33

U ovom radu predstavljen je deo rezultata istraživanja koji dotiču probleme sa kojima se suočavaju proizvođači dizel motora. Stalni pritisci, sadržani zakonskom regulativom, intenziviraju aktivnosti u ovoj oblasti. Smanjenje nivoa toksičnosti izduvne emisije dizel motora postiže se konstrukcijskim izmenama na motoru, primenom novih materijala, razvojem i optimizacijom sistema ubrizgavanja, naknadnim tretmanom izduvnih gasova, kao i usklađivanjem kvaliteta goriva. Razvoj motora TDM33, radi smanjenja toksične emisije izduvnih gasova, obuhvatio je, u osnovi, adaptaciju osnovne verzije motora DM33, uz primenu turbokompresora. Osnovni razlozi za primenu turbopunjenja su povećanje specifične snage motora i smanjenje specifične potrošnje goriva. Međutim, primena turbopunjenja jeste i vrlo efikasan način za poboljšanje efikasnosti sagorevanja, odnosno za smanjenje emisije toksičnih komponenata i dima. Poslednjih godina ovaj aspekt primene turbopunjenja dobija sve veći značaj, s obzirom na sve strože ekološke zahteve koje dizel motori moraju da zadovolje [3].

Danas su vrlo zastupljeni motori sa turbopunjenjem kod većine proizvo-

đača dizel motora, kao načina u zadovoljenju propisa izduvne emisije. Pored toga, za zadovoljenje propisa izduvne emisije dizel motora, namenjenih ugradnji u traktore i ostalu poljoprivrednu i šumsku mehanizaciju, u primeni je i naknadni tretman izduvnih gasova. U tom pravcu realizovan je konvertor sa katalizatorom domaće proizvodnje [2].

Izduvna emisija motora TDM33

U Institutu za motore Mašinskog fakulteta Beograd i Institutu IMR, realizovana su ispitivanja različitih mogućnosti smanjenja toksične izduvne emisije motora TDM33. Ovaj motor je namenjen za pogon nove generacije traktora domaće proizvodnje. Osnovna verzija motora DM33, na kojem su počela istraživanja, ima vrlo nepovoljnu emisiju toksičnih parametara. Program istraživanja obuhvatio je uporedna ispitivanja funkcionalnih karakteristika i emisije izduvnih gasova motora TDM33. U toku ispitivanja vršena je optimizacija sprege turbokompresora i motora, kao i varijacija osnovnih regulacionih parametara sistema ubrizgavanja, i to: ugla predubrizgavanja i karakteristika brizgača (pritisak ubrizgavanja, veličine i broj otvora na brizgaču). Sve promene na motoru razmatrane su sa stanovišta efekta smanjenja toksičnosti emisije [7].

Uslovi i metodologija ispitivanja

Ispitivanje emisije dizel motora sprovodi se po standardima, kojima je propisana merna oprema, procedura ispitivanja i obrada podataka. U tabeli 1 prikazane su granične vrednosti parametara izduvne emisije prema propisu ECE R96.

Na slici 1 prikazani su režimi ispitivanja po pravilniku ECE R96, odnos-

Tabela 1

Traktorski motori ECE R96 8-stupni ciklus				
Snaga motora (kW)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	PT (g/kWh)
$P \geq 130$	5	1,3	9,2	0,54
$75 \leq P \leq 130$	5	1,3	9,2	0,7
$37 \leq P \leq 75$	6,5	1,3	9,2	0,85

sonde na 20 mm od prirubnice izduvnog kolektora. Uzorak je, zatim, prečišćen pomoću filtera koji je smešten u komori čija se temperatura automatski održava na 190°C, a zatim se vodi grejanim sistemom vodova do analizatora za kontinualnu analizu. Analizatori su: nedisperzivni infracrveni (NDIR) za CO i CO₂, termoregulacioni (TM) za O₂ i plamenojonizujući detektor (FID) za HC i grejni heminoluminiscentni (CLA) analizator NO_x. Pored emisije merene su, na standardni način, funkcionalne karakteristike motora.

Sl. 1 — Režimi ispitivanja motora prema pravilniku ECE R96

no funkcionalna zavisnost opterećenja motora i broja obrtaja. Za ispitivanje varijanti motora TDM33 korišćena je merna oprema prikazana na slici 2.

Merna instalacija u potpunosti je razvijena prema zahtevima pravilnika ECE R-49 i ECE R-96. Uzorak izduvnog gasa uziman je pomoću standardne

Snimanja funkcionalnih parametara i emisije vršena su za svaku promenu regulacionih parametara motora. To znači da su za svaku izmenu parametara ubrizgavanja, elementa ubrizgavanja, pumpe visokog pritiska i brizgača registrovani toksični izduvni parametri kao i funkcionalne karakteristike motora.

Sl. 2 — Merna oprema za emisiju izduvnih gasova

Rezultati ispitivanja

Ugradnja turbokompresora na u-sisnu varijantu motora zahtevala je detaljna razmatranja izbora optimalnog turbokompresora. Izabran je tip koji po svojim karakteristikama najviše odgovara motoru DM33. Na slici 3 prikazana je mapa turbokompresora KKK 2067 GGD i ucrtane su vrednosti protoka (linije 1—4) usisne količine vazduha prema karakteristikama motora TDM33 sa turbokompresorom, za različite regulacije sistema ubrizgavanja, odnosno snage motora. Sa dijagrama se može zaključiti da odabranim turbokompresorom nisu postignuti optimalni rezultati, odnosno kriva protoka usisnog vazduha nije u području optimalnog stepena korisnosti turbokompresora.

Na slici 4 prikazana je snaga motora u zavisnosti od varijante regulaci-

je sistema ubrizgavanja. Prikazani su rezultati pet varijanti motora i to osnovne verzije motora DM33 i varijante sa natpunjenjem, ali sa različitim nominalnim snagama na 2250 obrtaja u minutu. Na slici 5 prikazani su rezultati specifične potrošnje goriva za iste varijante motora, a na slici 6 i 7 rezultati specifične emisije po osmostupnom ciklusu ispitivanja, odnosno pravilniku ECE R96, i to na slici 6 specifične emisije za osnovnu varijantu i dve varijante sa natpunjenjem. Prikazani rezultati specifične emisije čestica dobijeni su proračunskim putem. Na slici 7 prikazana je specifična emisija za varijante motora sa natpunjenjem, ali sa različitim uglom predubrizgavanja. Vrednosti specifične emisije čestica dobijeni su proračunskom metodom.

Sl. 3 — Mapa turbokompresora KKK 2067 GGD

Sl. 4 — Snaga različitih varijanti motora

Sl. 5 — Specifična potrošnja goriva različitih varijanti motora

Sl. 6 — Specifična emisija motora

Sl. 7 — Specifična emisija motora sa napunjenjem za različite uglove predubrivanja

Sl. 8 — Efikasnost katalizatora za toksične parametre

Sl. 9 — Efikasnost katalizatora prema ciklusima ispitivanja

Ispitivanja efikasnosti konvertora sa katalizatorom obavljena su na osnovnoj varijanti motora. Rezultati su prikazani na slikama 8 i 9. Na slici 8 prikazani su rezultati efikasnosti po ciklusima ispitivanja i to redom CO, HC i NO_x, a na slici 9 prema ciklusima ispitivanja.

Analiza rezultata

S obzirom na to da varijanta prirodnog punjenog motora DM33 ima nepovoljnu, visoku emisiju toksičnih komponenti, primenom natpunjenja postignuti su povoljni rezultati, ali pravilnik o graničnim vrednostima emisija nije zadovoljen. Efikasnost katalizatora, kao i izmerena specifična emisija varijanti motora sa natpunjenjem, pokazuje zadovoljenje zakonske regulative u oblasti dizel motora namenjenih za ugradnju u poljoprivrednu i šumarsku mehanizaciju.

Analizirajući spregu motora i turbokompresora može se uočiti da postojeći turbokompresor ne odgovara. Na to navode rezultati ispitivanja, gde se na režimu nominalne snage ne postiže pritisak natpunjenja veći od 0,7 bara, pa su samim tim radne krive motora, locirane u donjem delu mape kompresora, praktično ispod zone optimalnih vrednosti stepena korisnosti kompresora. To je naročito izraženo na nižim režimima rada motora $n=1000-1500 \text{ min}^{-1}$. U osnovi svake ugradnje turbokompresora na prirodno punjen dizel motor očekuje se povećanje snage motora za 20 do 25%. S obzirom na to da cilj istraživanja nije povećanje snage, već smanjenje toksičnosti izduvne emisije, istraživanja su vršena sa varijantama motora snage do 41 kW.

Ispitivanja efikasnosti konvertora sa katalizatorom pokazala su da efekat

smanjenja toksičnih parametara iznosi kod ugljenmonoksida — CO za oko 50% a ugljovodonika — HC za oko 60%. Katalizator je domaće proizvodnje i čine ga kuglice od fine dispergovane platine u spoljašnjem sloju poroznog omotača Al₂O₃. Efikasnost smanjenja CO i HC zavisi, pre svega, od temperature izduvnih gasova i bitno se poboljšava kada je ona iznad 300°C. Zbog toga je efikasnost na punom opterećenju i preko 80%, a na nižim opterećenjima ispod 20%.

Rezultati ispitivanja pokazali su da je optimalna regulacija, kojom se postižu najniže vrednosti specifične emisije azotovih oksida — NO_x, a pri primeni sistema ubrizgavanja sa distributor-pumpom i uglom predubrizgavanja $\alpha_{pu}=8^\circ$. Kako su, uz zadovoljenje granice za NO_x, ostali parametri izvan dozvoljenih granica, primenjen je naknadni tretman izduvnih gasova

Sl. 10 — Emisija toksičnih parametara motora TDM33 sa katalizatorom

konvertorom sa katalizatorom. Svedene vrednosti specifičnih toksičnih parametara za motor TDM33 prikazane su na slici 10. Specifična emisija čestica dobijena je proračunskom metodom.

Zaključak

Radi zadovoljenja ekoloških zakonskih propisa (standarda) izduvne emisije dizel motora kontinualno se sprovode istraživanja i razvoj motora IMR. Rezultat istraživanja i razvoja predstavlja dizel motor TDM33 sa katalizatorom, kojim je zadovoljen standard ECE R96. Do povoljnih rezultata istraživanja došlo se primenom natpu-njenja i optimizacijom sistema ubrizgavanja. Pored toga, ugrađen je sistem za naknadni tretman izduvnih gasova, odnosno konvertor sa katalizatorom. Istraživanja su otvorila nove moguć-

nosti za smanjenje toksičnosti dizel motora IMR, na primer, razvojem sistema ubrizgavanja sa linijskom pum-pom.

Generalno gledano, aktivnosti na istraživanju smanjenja izduvne emisije dizel motora daju doprinos obezbeđenju konkurentnosti proizvoda sa vodećim svetskim proizvođačima dizel motora namenjenim ugradnji u poljoprivrednu i šumarsku mehanizaciju. Pored toga, od velikog značaja su rezultati postignuti u smanjenju toksičnosti izduvne emisije motora, koji direktno doprinose zaštiti životne sredine.

Literatura:

- [1] Petrović, S., Tomić, M. i dr.: Negativni efekti eksploatacije motora SUS i njihov odraz na budući razvoj, Skup Mašinstvo za XXI vek, Zbornik radova, Novi Sad, 1995.
- [2] Miljković, M., Petrović, S., Tomić, M., i dr.: Mogućnosti smanjenja toksične emisije dizel motora naknadnim tretmanom izduvnih gasova, MVM 94, Kragujevac, 1994.
- [3] Miljković, M., Petrović, S., i dr.: Mogućnosti smanjenja toksične emisije dizel motora primenom turbokompresora, NMV 95, Beograd, 1995.
- [4] Matejić, M.: Prilog proučavanju uticaja radnih parametara sistema za ubrizgavanje goriva na izduvnu emisiju dizel motora, magistarski rad, Beograd, 1996.
- [5] Matejić, M., Petrović, S., i dr.: Smanjenje toksične izduvne emisije dizel motora, MVM 96, Kragujevac, 1996.
- [6] Marković, Lj., Petrović, P., i dr.: Emisija izduvnih gasova dizel motora i uticaj motornog ulja na nju, GALAX 96, Kopaonik, 1996.
- [7] IMR-MF-MNTR: projekat Smanjenje izduvne emisije dizel motora, potprojekt Primena turbopunjenja na motoru DM33.
- [8] Babović, P., Petković, N., Petrović, P.: Novi hidraulični podizač traktora Industrije motora Rakovica sa aspekta efikasnijeg regulisanja agregata, Poljoprivredna tehnika, Beograd, novembar, 1996.
- [9] Petrović, P., Marković, Lj.: Traktor R-55DV-EKO u susret novim propisima, Poljoprivredni fakultet Beograd, novembar, 1996.