

YU-95225

MOGUĆNOSTI SMANJENJA TOKSIČNE IZDUVNE EMISIJE DIZEL MOTORA UGRADNJOM
TURBOKOMPRESORA

POSSIBILITIES FOR REDUCTION OF DIESEL ENGINE TOXIC EMISSION USING

Maja Miljković, dipl. ing., Prof. dr Stojan Petrović, Bratislav Obradović, dipl. ing., Slobodan Popović, dipl. ing.

*Mašinski fakultet, Beograd,*Ljubiša Marković, dipl. ing., *IMR-Rakovica*

IZVOD Primena turbopunjenja na dizel motorima je često korišćen način za povećanje specifične snage i smanjenje specifične potrošnje motora. Pored toga primena turbopunjenja je i efikasan način za poboljšanje efikasnosti sagorevanja, odnosno smanjenje emisije gasovitih toksičnih komponenata i dima. S obzirom na sve oštrije zakonske propise i tendenciju njihovog pooštavanja, ovaj aspekt primene turbopunjenja dobija sve veći značaj pa se većina svetskih proizvođača opredeljuje za inoviranje postojećih motora ugradnjom turbokompresora. U ovom radu prikazana su ispitivanja prototipa domaćeg motora DM33 sa ugrađenim turbokompresorom. Dosadašnja ispitivanja su dala pozitivne rezultate u pogledu smanjenja toksične izduvne emisije.

KLJUČNE REČI: turbopunjenje, izduvna emisija, dizel-motor

ABSTRACT Turbocharging is often used in diesel engines as a method to boost the power per unit displacement and to lower the specific fuel consumption, it is also an efficient method to increase combustion efficiency, what causes the reduction in emission of toxic gaseous pollutants, smoke and particulate in diesel engine exhaust gases. Considering a distinct trend to make existing regulations more stringent, this aspect of using turbocharging is getting more important. In such terms, most of world famous diesel engine's manufactures are using turbocharging to innovate existing engine models. This paper presents the results of DM33 Turbo engine prototype testing. The research which has been done so far, gives positive results in respect of toxic engine emission reduction.

KEY WORDS: turbocharging, exhaust emission, diesel engine

UVOD

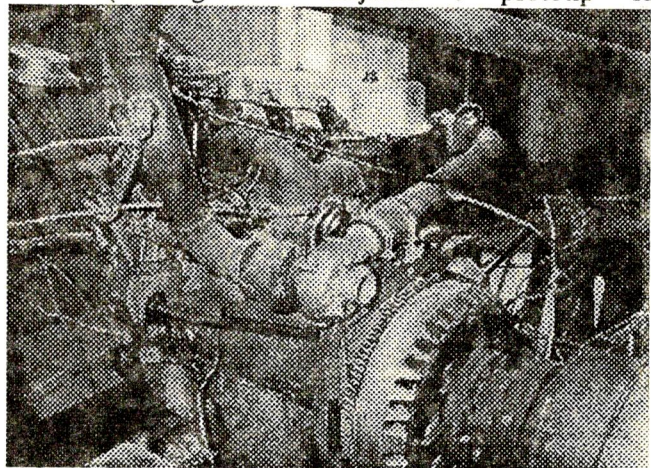
Pod natpunjenjem motora sa unutrašnjim sagorevanjem podrazumeva se povećanje pritiska svežeg punjenja, u odnosu na uslove okoline, upotrebom određene vrste kompresora. Na taj način povećava se količina svežeg punjenja u radnom prostoru motora. Poznato je da je maksimum snage koji se može dobiti iz neke radne zapremine uslovljen je ograničenom količinom goriva koja u njoj može sagoreti. Ova količina goriva, opet, zavisi od količine vazduha koji stoji na raspolaganju za obrazovanje smeše. Stoga, veća količina svežeg vazduha automatski omogućava sagorevanje više goriva, odnosno dobijanje veće snage iz neke radne zapremine. Pored dobijanja veće specifične snage motora, natpunjenjem se može postići bolja ekonomičnost motora zahvaljujući povoljnijem odnosu indikatorske snage prema snazi mehaničkih gubitaka.

Povećanje gustine svežeg punjenja može se ostvariti na različite načine. Najširu primenu ima postupak natpunjenja upotrebom turbokompresora. U tom slučaju koristi se kompresor koga pogoni turbina koja se pokreće korišćenjem energije izduvnih gasova.

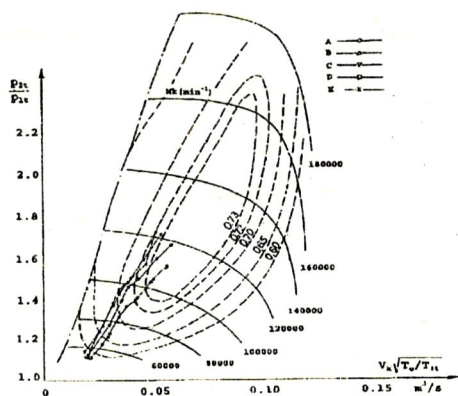
Povećanje specifične snage i smanjenje specifične potrošnje dugo su bili dominantni razlozi za primenu turbopunjenja, naročito kod dizel motora. Međutim primena turbopunjenja je i vrlo efikasan način za poboljšanje efikasnosti sagorevanja, odnosno za smanjenje emisije gasovitih toksičnih komponenata i dima. Poslednjih godina ovaj aspekt primene turbopunjenja dobija sve veći značaj, s obzirom na sve oštrije ekološke zahteve koji dizel motori moraju da zadovolje. Danas je situacija takva, da se većina proizvođača dizel motora opredelila za turbopunjenje kao neophodni način za zadovoljenje sve oštrijih zakonskih propisa u pogledu izduvne emisije.

PRIMENA TURBOPUNJENJA NA
MOTORU DM33

U Institutu IMR-a projektovan je i izrađen prototip motora DM33 (2.5 l, direktno ubrizgavanje, 35 kW) sa ugrađenim turbokompresorom. Razlozi za ugradnju turbokompresora na ovaj motor bili su činjenica da je on u originalnom izvođenju vrlo nepovoljan u pogledu emisije gasovitih toksičnih komponenata i dima u izduvnim gasovima, kao i potreba da se postigne nešto veća snaga. Efekat primene turbopunjenja na izduvnu emisiju ispitivan je u Institutu za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu, gde su izvršena ispitivanja originalnog motora i prototipska ispitivanja motora sa ugrađenim turbokompresorom, i to za različite regulacije sistema za ubrizgavanje. Na motor je ugrađen turbokompresor proizvodnje KKK, tipa K-41 sa kompresorom 2067 GGB i turbinom 7.18. Ispitivani motor (i originalna varijanta i prototip sa



Sl 1. Motor DM33 Turbo na probnom stolu



Sl. 2. Radna tačka motora DM33 Turbo u mapi kompresora KKK K-41

turbokompresorom) imao je ugrađenu rotacionu pumpu visokog pritiska (DPA proizvodnje IPM). Fotografija motora DM33 sa ugrađenim turbokompresorom prikazana je na slici 1.

METODOLOGIJA ISPITIVANJA

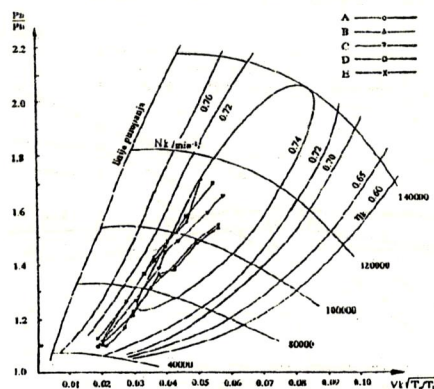
Za ispitivanje kako originalnog motora DM33, tako i prototipa sa ugrađenim turbokompresorom korišćena je postojeća instalacija za merenje gasne emisije prilagođena zahtevima pravilnika ECE R-49 i ECE R-24. Sistem za uzimanje uzorka izduvnog gasa i njegovu kontinualnu analizu izrađen je na osnovu propisane metodologije Pravilnika ECE R-49. Uzorak izduvnog gasa uziman je pomoću standardne sonde na 20 cm od prirubnice izduvnog kolektora. Neposredno zatim uzorak je prečišćavan pomoću keramičkog filtra, čija je temperatura automatski održavana na 190 °C, i prebacivan do sistema za kontinualnu analizu sastava izduvnih gasova. Analizatori za analizu izduvnih gasova korišćeni pri ovom ispitivanju su: nedisperzioni infracrveni (NDIR) za CO i CO₂, termomagnetni (TM) za O₂, plamenojonizacioni detektor (FID) za HC, svi od firme HARTMANN & BRAUN i grejani hemiluminiscentni (CLA) analizator za NO_x, firme HORIBA. Ispitivanje emisije dima vršeno je prema pravilniku ECE R-24, na punom opterećenju motora pri ustaljenim brzinskim režimima između minimalnog i maksimalnog broja obrtaja motora. Merenje dima vršeno je na standardni način merenjem opaciteta izduvnog gasa (metoda "HARTRIDGE"), kao i korišćenjem metode "Bosch".

Pored emisije, merene su, na standardni način, sledeće pogonske karakteristike: snaga motora, efektivni obrtni moment, specifična efektivna potrošnja, ciklusna potrošnja itd. Merenja su izvršena na krivoj pune snage. Takođe, merena je i emisija gasnih zagađivača prema pravilniku ECE R-49, s tim što je kao kontrolni test korišćen kako 13-to stupni ciklus, tako i novi 8-mo stupni ciklus namenjen za traktorske motore. Merenja su vršena i za originalni motor i za različite regulacije sistema za ubrizgavanje motora sa ugrađenim turbokompresorom. Navedena merenja, na narednim prikazima, imaju sledeće oznake:

STD - Originalni, usisni motor DM33 - snaga 35 kW, ugao predubrizgavanja $\alpha_{pu}=20^\circ$;

A - DM33 Turbo, regulacija pumpe visokog pritiska kao na originalnoj usisnoj verziji motora, snaga 35 kW, ugao predubrizgavanja $\alpha_{pu}=20^\circ$;

B - DM33 Turbo, snaga 35 kW, ugao predubrizgavanja $\alpha_{pu}=12^\circ$;



Sl. 3. Radna tačka motora DM33 Turbo u mapi kompresora IHI BRL348C

C - DM33 Turbo, povećana ciklusna količina goriva za postizanje snage $P_e=41$ kW, ugao predubrizgavanja $\alpha_{pu}=12^\circ$;

D - DM33 Turbo, povećana ciklusna količina goriva za postizanje snage $P_e=39$ kW ali je korigovana karakteristika ubrizgavanja, ugao predubrizgavanja $\alpha_{pu}=12^\circ$;

E - DM33 Turbo, povećana ciklusna količina goriva za postizanje snage $P_e=41$ kW ali je korigovana karakteristika ubrizgavanja, ugao predubrizgavanja $\alpha_{pu}=8^\circ$.

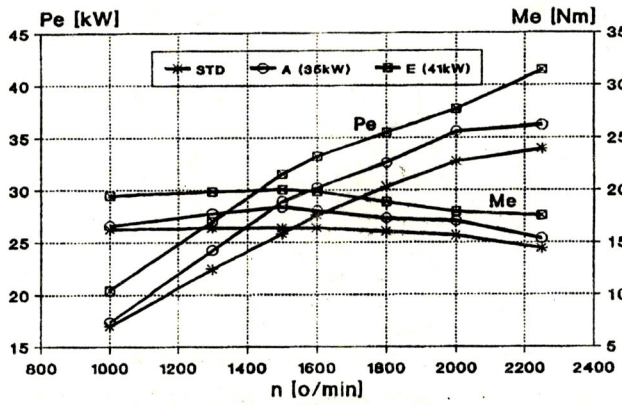
REZULTATI ISPITIVANJA

Na slici 2. prikazana je mapa turbokompresora KKK K14-2067 GGB i radne krive motora DM33 sa turbokompresorom za različite regulacije sistema za ubrizgavanje.

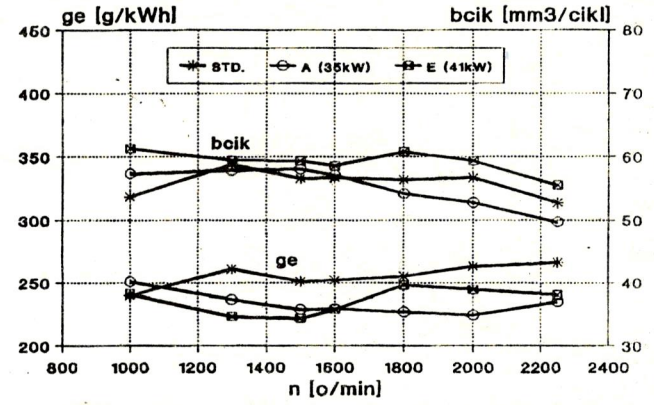
Generalno, za sve navedene varijante, položaj radnih krivih motora u odnosu na granicu pumpanja relativno je dobar, mada ulevo od optimalnog (slika 2.). Radne tačke na 2000 i 2250 min⁻¹ kod regulacija sa oznakama A, B i C su u okviru oblasti maksimalnog stepena korisnosti kompresora η_k (tzv. "oko mape"). Š obzirom na položaj "oka mape", očigledno je da se radi o kompresoru namenjenom ugradnji na dizel motore koji na režimu nominalne snage postižu pritiske natpunjenja od oko 1 bar, sa većim nominalnim protocima. Međutim, motor DM33 sa ugrađenim turbokompresorom, bez obzira na vrstu regulacije pumpe visokog pritiska, na režimu nominalne snage ne postiže pritisak natpunjenja veći od 0,7 bar i zato su radne krive motora locirane u donjem delu mape kompresora, praktično ispod zone optimalnih vrednosti stepena korisnosti kompresora η_k . Ovo je naročito izraženo na nižim brojevima obrtaja motora $n=1000-1500$ min⁻¹. U slučaju ugradnje manjeg kućišta turbine, radne krive bi se pomerile ulevo, bliže granici pumpanja, u zonu nižih vrednosti koeficijenata korisnosti kompresora.

Nameće se zaključak da je ovakvom motoru primereniji drugačiji kompresor, čija mapa odgovara nižim stepenima natpunjenja. Na slici 3. prikazan je primer mape turbokompresora IHI BRL348C u koju su ucertane radne krive ispitivanog motora. Vidi se da bi se primenom ovakvog turbokompresora radne krive pomerile znatno bliže "oku mape" u zonu najviših stepena korisnosti kompresora.

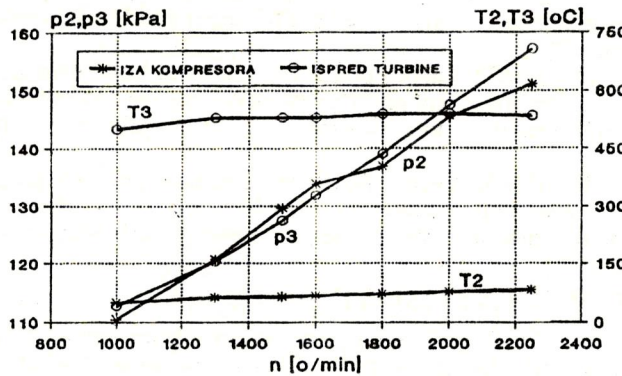
Sl.4 Snaga i obrtni moment



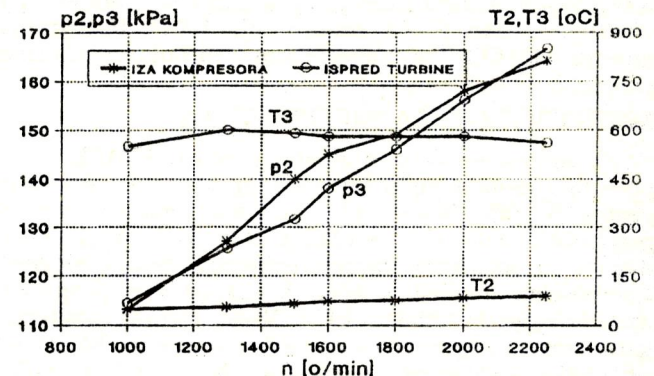
Sl.5 Cikl. kolicina i potrosnja goriva



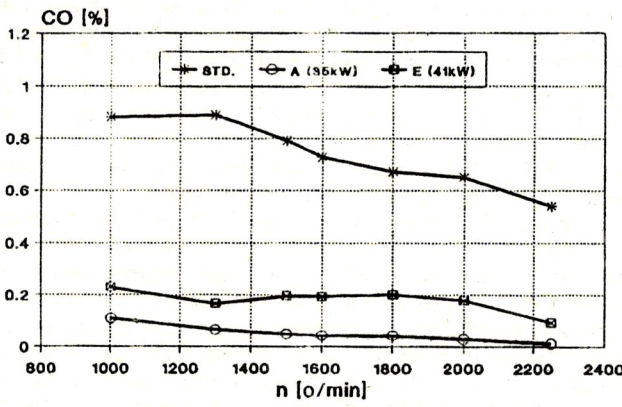
Sl.6 Pritisci i temperature
Pemax=35kW, predubrizgavanje - 20 oKV



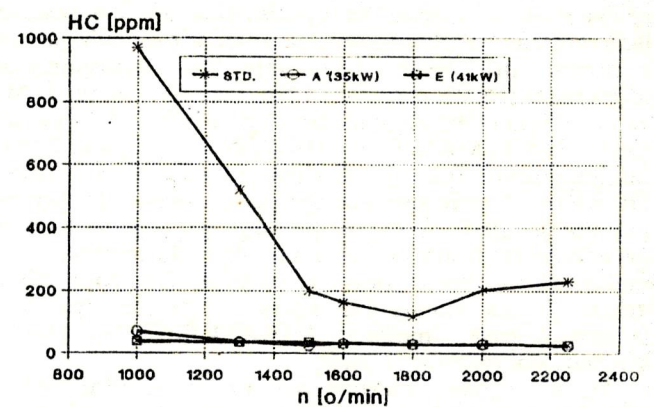
Sl.7 Pritisci i temperature
Pemax=41kW, predubrizgavanje - 12 oKV



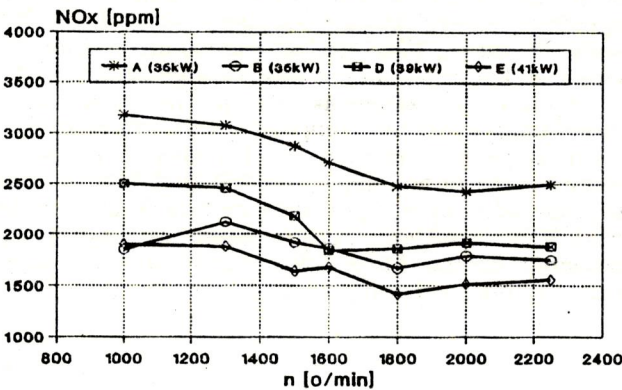
Sl.8 Emisija ugljen-monoksida



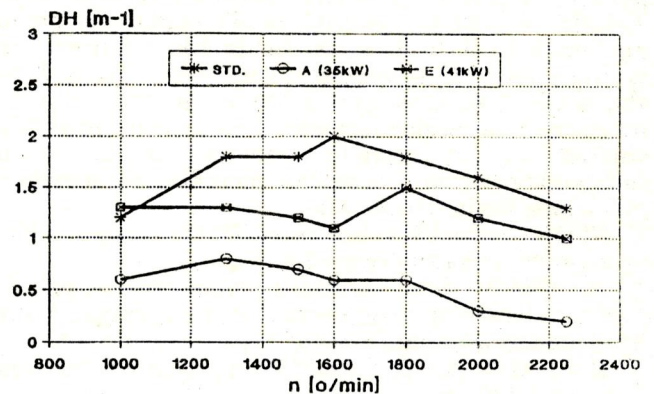
Sl.9 Emisija nesagorelih ugljovodonika



Sl.10 Emisija azotovih oksida

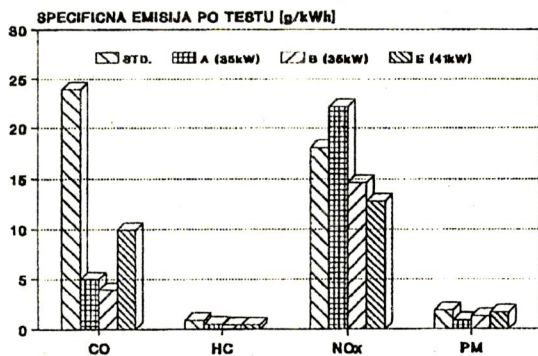


Sl.11 Koeficijent apsorpcije Hartridge



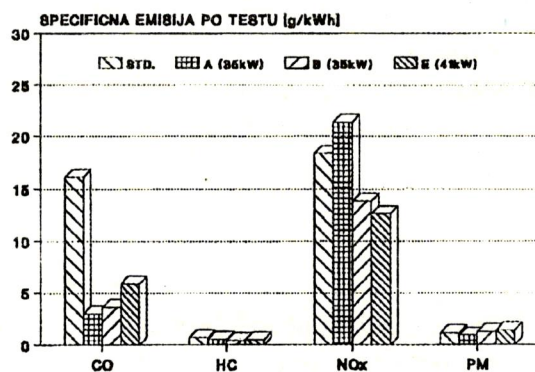
Sl.12 Specifična emisija po testu

13-to stupni ciklus



Sl.13 Specifična emisija po testu

8-mo stupni ciklus



Na slici 4. prikazani su dijagrami promene snage motora i efektivnog obrtnog momenta, a na slici 5 promena specifične efektivne potrošnje i ciklusne potrošnje za originalni motor (STD) i regulacije motora sa turbokompresorom (A,E).

Na slikama 6. i 7. prikazane su promene pritiska i temperature ispred turbine i pritiska iza kompresora za regulacije A i E.

Na slikama 8. 9. i 10. prikazano je uporedno ponašanje emisije ugljen-monoksida (CO), nesagorlih ugljovodonika (HC) i azotnih oksida (NOx) na krivoj pune snage za originalni motor (STD) i regulacije A i E.

Slike 4-10 pokazuju da se sa regulacijom A postiže odnos pritiska punjenja 1.6 i snaga od 35 kW, koja je bliska snazi originalnog motora. Pritisak iza kompresora je blizak pritisku ispred turbine pa efekat na specifičnu potrošnju nije veliki, ali je zato emisija CO i HC značajno manja jer motor radi sa siromašnijom smešom. Sa regulacijom E postiže se odnos pritiska punjenja od 1.75, veća snaga zbog povećane ciklusne količine goriva, kao i nešto veći odnos pritiska iza kompresora i ispred turbine, što ima povoljniji efekat na potrošnju. Emisija CO i HC malo je veća u odnosu na regulaciju A ali je i dalje značajno niža u odnosu na originalni motor. Emisija NOx smanjuje se bitnije tek uz smanjenje ugla predubrizgavanja (slika 10) tako da se pri tome ne utiče bitnije na razvijenu snagu i potrošnju, ali se time nešto povećava emisija dima.

Na osnovu merenja količine dima u izduvnim gasovima zaključuje se da je motor IMR DM33 u originalnom izvođenju veoma nepovoljan u ovom pogledu i da na nekoliko režima izmerni koeficijent apsorpcije čak prelazi dozvoljenu vrednost. Motor sa ugrađenim turbokompresorom i nepromenjenom ciklusnom količinom goriva u odnosu na standardni motor ima znatno smanjenu emisiju dima (regulacija A). Međutim, sa povećanom ciklusnom količinom goriva i smanjenjem α_{pu} (regulacija E) emisija dima je dva puta veća u odnosu na regulaciju A, ali je još uvek je niža nego kod originalnog motora, (slika 11).

Na slikama 12 i 13 prikazani su rezultati merenja specifične emisije gasnih toksičnih komponenata i čestica za 13-to stupni i 8-mo stupni ciklusu, i to za originalni motor i regulacije A, B i E motora sa ugrađenim turbokompresorom. Sa slike 12 vidi se da motor sa ugrađenim turbokompresorom ima pri svim regulacijama značajno nižu emisiju CO i HC po testu. Sadržaj NOx u izduvnim gasovima je veći u slučaju ugrađene turbokompresora pri zadržanoj regulaciji originalnog motora (A). Smanjenjem ugla predubrizgavanja (regulacija B) smanjuje se emisija

NOx za oko 20%. Sa povećanom ciklusnom količinom goriva, ali i sa daljim smanjenjem ugla predubrizgavanja postiže se smanjenje emisije NOx za 29% (regulacija E). Što se tiče emisije čestica ona je na vrlo visokom nivou kako kod originalnog motora tako i pri svim regulacijama motora sa ugrađenim turbokompresorom. Slični zaključci se odnose i na rezultate 8-mo stupnog ciklusa (slika 13).

ZAKLJUČAK

Na osnovu svih sprovedenih ispitivanja moguće je sumirati rezultate u pogledu daljih pravaca i mogućnosti optimizacije sprege motor-turbokompresor, kao i u pogledu mogućeg daljeg smanjenja izduvne emisije ovog motora:

1. Originalni motor DM33 nepovoljan je, kako u pogledu emisije dima tako i u pogledu emisije gasovitih toksičnih komponenata. Primena turbopunjenja smanjuje emisiju dima i gasovitih zagađivača (naročito CO i HC). Uz odgovarajuću optimizaciju sistema za ubrizgavanje moguće je postići čak i značajnije smanjenje emisije. Emisija čestica pri svim regulacijama ispitivanog motora ostaje na visokom nivou, ali se nešto smanjuje upotrebom turbokompresora i izborom većeg ugla predubrizgavanja.

2. Ugrađnjom turbokompresora na motor DM33 i optimizacijom sprege motor-turbokompresor kao i sistema za ubrizgavanje moguće je zadovoljiti trenutno važeće propise ECE R-24.03 i ECE R-49.01.

3. Da bi ovaj motor zadovoljio novi, oštrij propis ECE R-49.02 neophodno je izvršiti obimnije usavršavanje sistema za ubrizgavanje, eventualno preduzeti dodatne mere za naknadni tretman izduvnih gasova, kao i druge zahvate u tom smislu.

Istraživanje u ovoj oblasti finansijski je pomoglo Ministarstvo za Nauku i tehnologiju Republike Srbije.

LITERATURA

[1] Petrović S., "Aktuelno stanje i trend rešavanja problema izduvne emisije i potrošnje goriva motora sus", NMV '93, Zbornik radova motori i putnička vozila, Beograd, 1993.

[2] Petrović S., Veselinović B., Popović V., "The Exhaust Emissions Problems of Agricultural Tractor Diesel Engines in Yugoslavia", CONAT, Brasov

[3] Miljković M., Petretović S., Tomić M., Obradović B. i dr., "Mogućnosti smanjenja toksične izduvne emisije dizel motora naknadnim tretmanom izduvnih gasova", Skup "Motorna vozila i motori '94"., Kragujevac