

Biblid: 0354-9496(2002) 7:2, p.29-35
UDK:631.372:669-8

Naučni rad
Scientific paper

UTICAJ RECIRKULACIJE IZDUVNIH GASOVA NA KVALITET IZDUVNE EMISIJE TRAKTORSKOG DIZEL MOTORA

THE INFLUENCE OF EXHAUST GAS RECIRCULATION ON THE QUALITY OF TRACTOR DIESEL ENGINE EXHAUST EMISSION

*Knežević, D. Popović, S. Petrović, S. Matejić, M.**

REZIME

U radu se daju rezultati eksperimentalnog istraživanja uticaja recirkulacije izduvnih gasova-EGR, na kvalitet izduvne emisije usisnog traktorskog dizel-motora sa direktnim ubrizgavanjem-IMR DM34/T. Obuhvaćeno je istraživanje efekta sistema EGR na tok i promenu osnovnih toksičnih komponenti u izduvnim gasovima dizel-motora (NO_x, HC, CO i dima), kao i specifične efektivne potrošnje goriva, zavisno od količine recikliranih gasova, odnosno EGR odnosa, broja obrtaja i opterećenja motora. Primenom sistema EGR na istraživanom motoru moguće je postići veoma visok stepen redukcije azotovih oksida, uz izvesno povećanje dimnosti motora. Emisije nesagorelih HC i ugljenmonoksida CO se takodje povećavaju i uglavnom prate tok rasta dimnosti. Može se konstatovati da primena sistema EGR na usisnoj varijanti traktorskog motora DM34/T daje veoma dobre rezultate u području nižih opterećenja, dok na višim i visokim opterećenjima primena navedenog sistema ukupno gledano nije celishodna, zbog bitnog povećanja emisije dima.

Ključne reči: dizel motor, recirkulacija izduvnih gasova, izduvna emisija

SUMMARY

The results of the experimental research of EGR (Exhaust Gas Recirculation) effects on the naturally aspirated tractor direct injection diesel engine IMR DM34/T are presented in this paper. The research of EGR system effects on the course and change of the basic toxic components in the exhaust gases of diesel engines (NO_x, HC, CO and smoke) are included, as well as the specific effective fuel consumption, depending on the quantity of the recirculated gases, engine speed and engine load. Applying the EGR system on the engine researched it is

* *Mr Dragan Knežević, dipl. ing. maš., Mr Slobodan Popović, dipl. ing. maš., Dr Stojan Petrović, dipl. ing. maš., Mr , Maja Matejić, dipl. ing. maš., Mašinski fakultet u Beogradu, 27. marta 80, 11000 Beograd*

possible to achieve very high nitrogen-oxides reduction degree with a certain increase of the engine smoke quantity. Unburned HC and carbonmonoxide CO emissions also increase and generally follow the smokeability increase course. It can be concluded that the application of the EGR system on the naturally aspirated tractor engine type DM34/T gives very good results at lower loads, while generally speaking, at higher and high loads the use of the system is questionable, and could not be justified because of the considerable smoke emission increase.

Key words: diesel engine, exhaust gas recirculation, exhaust emission

UVOD

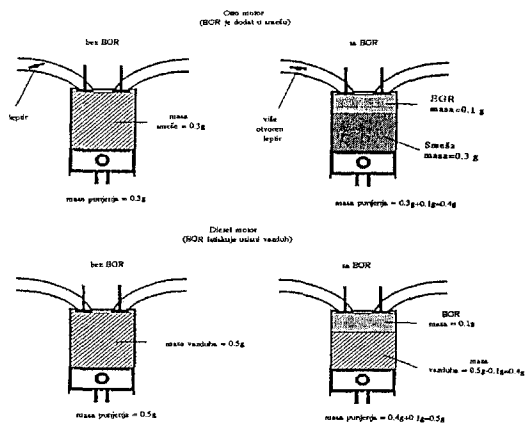
Pod sistemom recirkulacije izduvnih gasova ili skraćeno-EGR (Exhaust Gas Recirculation) podrazumeva se koncept primene uređjaja (podsklopa) na motoru (*oto ili dizel*), koji omogućava uvodjenje određene količine izduvnih gasova u njegov usisni sistem. U praksi je dokazano da sistem EGR predstavlja jednu od najefikasnijih, najjednostavnijih i najjeftinijih tehnika koje su trenutno dostupne za redukciju emisije NOx kod *oto i dizel motora*. Naravno, podrazumeva se da se ova tehnika, odnosno sistem, primenjuje u optimalnoj kombinaciji sa drugim poznatim metodama kada je reč o aktivnostima usmerenim ka optimiranju kvaliteta izduvne emisije motora. Medjutim, treba napomenuti da su, nažalost, primećene i neke kontraindikacije primene sistema EGR, naročito kod dizel motora, kao što su pogoršanje specifične efektivne potrošnje goriva - g_e i emisije čestica i čadji. Naročito EGR pogoršava pravac korelacije (*trade-off*) izmedju emisije NOx i čestica, pre svega pri visokim opterećenjima. Dalje, primena EGR se takodje loše odražava na kvalitet, efikasnost i trajnost motornog ulja skraćujući intervale njegove zamene /2,3/.

NAČIN PRIMENE SISTEMA EGR

Način na koji se sistem EGR primenjuje kod *oto i dizel motora* je fundamentalno različit, i te razlike su jasno prikazane na slici 1. Savremeni *oto motori* rade sa stehiometrijskom smešom *vazduh/gorivo*, i ako se npr. želi održati konstantna vrednost snage i momenta, potrebna je određena ciklusna količina svežeg punjenja - neka je to vrednost kao na slici 1. Ako se uvede EGR i ako se želi održati nepromenjena prethodna radna tačka u pogledu izlaznog momenta i snage, jasno je da i ciklusna masa svežeg punjenja mora biti nepromenjena. Iz ovog razloga masa EGR koja se unosi svežim punjenjem (kao na sl. 1), mora biti pridodata masi tog punjenja, tako da se ukupna masa punjenja (*smeša vazduh/gorivo + EGR*) povećava. Pošto je zapremina cilindra motora fiksna ovo povećanje ukupne mase sveže smeše (*vazduh + gorivo + EGR*) može se postići povećanjem ukupne količine odnosno gustine punjenja, što uslovljava potrebu nešto većeg otvora leptira u usisnom sistemu motora. Sporedna korist od ovog povećanja otklona leptira, jeste smanjenje pumpnog rada i izvesno poboljšanje ekonomičnosti motora usled toga.

Kada je reč o *dizel motorima*, oni kao što je poznato, nemaju namerno prigušenje na usisu (tj. rade bez leptira osim kod nekih starijih konstrukcija traktorskih dizel motora kao što je npr. motor IMR-033 za traktor IMT 533). Dizel motor praktično na svim režimima i u svakoj radnoj tački usisava istu ciklusnu količinu vazduha - neka je to kao na slici 1. Ako se radnom ciklusu dodaju izduvni gasovi sistemom EGR, npr. kao na slici, dolazi do "istiskivanja" izvesne količine svežeg vazduha iz usisa i njegove zamene ekvivalentnom količinom izduvnih gasova iz EGR-a. Posledica ovog istiskivanja svežeg vazduha je njegovo "razredjenje" u pogledu

sadržaja kiseonika, odnosno u krajnjoj liniji smanjenja količine dostupnog aktivnog vazduha (kiseonika) koji bi mogao biti iskorišćen u procesu sagorevanja. Pošto za datu snagu i obrtni moment, ciklusna količina goriva koja se ubrizgava u cilindar mora ostati konstantna, smanjena masa vazduha koja je dostupna za sagorevanje, smanjuje odnos *vazduh/gorivo* pri kome motor radi. Upravo ovo smanjenje odnosa *vazduh/gorivo*, odnosno koeficijenta viška vazduha - λ , može značajno uticati na sastav i kvalitet izduvne emisije traktorskog dizel motora.



Sl.1 Poredjenje sistema EGR primenjenog kod oto i dizel motora

Fig.1 Comparison of the EGR system applied to otto and diesel engines

PRIMENA SISTEMA EGR NA DIZEL MOTORU IMR DM-34/T

U cilju eksperimentalnog istraživanja uticaja primene

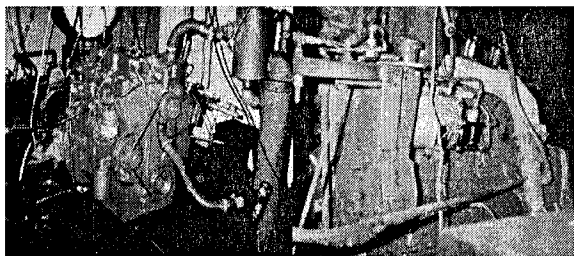
sistema recirkulacije izduvnih gasova na promenu sadržaja glavnih toksičnih komponenti izduvne emisije dizel motora DM 34/T, u Institutu za motore Mašinskog fakulteta u Beogradu, formirana je odgovarajuća istraživačka instalacija. Prilikom ovih ispitivanja nisu vršene nikakve korekcije konstruktivno-procesnih parametara standardnog ispitivanog motora domaće proizvodnje (IMR-Beograd), niti sistema za ubrizgavanje. Motor DM 34/T se inače koristi kao pogonski agregat traktora domaće proizvodnje *IMT 565, Rakovica 65 i R65DV*.

Takodje cilj ispitivanja je bio da se utvrdi uticaj EGR na nivo emisije, zavisno od radnog režima motora, odnosno brzine ciklusa i opterećenja. Na osnovu dobijenih rezultata mogu se doneti zaključci o efektu primenjenog sistema na nivo redukcije toksičnih komponenti, a na osnovu analize nivoa sniženja i povećanja emisije po komponentama proceniti opravdanost primene ovog sistema na konkretnom motoru. Sam sistem recirkulacije je sadržao dve EGR-grane, kao što je prikazano na slici 2. Prva se sastojala od cevi većeg unutrašnjeg prečnika (30 mm), a druga od cevi manjeg unutrašnjeg prečnika (10 mm). Regulacija protoka gasa kroz veću cev vršena je pomoću loptaste slavine, a kroz manju pomoću ventila zasunskog tipa. U toku ispitivanja uglavnom je korišćena EGR-grana većeg protoka koja je bila u stanju da ostvari maksimalnu recirkulaciju gasa od 49%. Odmah treba napomenuti da je ovako visok stepen recirkulacije imao smisla samo pri nižim opterećenjima, dok je kod viših opterećenja dolazilo do veoma jakog dimljenja motora. EGR tok nižeg protoka mogao je da ostvari nivo od 7% recikliranih izduvnih gasova, pa je stoga redje upotrebljavan, ali je ponekad mogao dobro da posluži prilikom fine regulacije veličine protoka.

U ovom radu biće prikazani samo veoma ograničeni, ali dovoljno reprezentativni rezultati istraživanja za dva brzinska režima (1245 o/min i 1800 o/min) i četiri nivoa opterećenja od oko 10%, 30%, 50% i 75% i to za nehladjenu varijantu EGR.

Da bi se ispitalo efekat recirkulacije izduvnih gasova na promenu sastava izduvne emisije, od

velike je važnosti da se što tačnije i preciznije odredi količina izduvnih gasova koja se u procesu recirkulacije uzima iz izduvne cevi i vraća u usisni sistem. Nivo (količina) EGR gasova može se definisati zapreminski, na molarnoj osnovi, maseno i preko koncentracije ugljendioksida u izduvnom i usisnom traktu motora. Zapreminska definicija je veoma pogodna jer se količina EGR gasova definiše kao procentualno smanjenje odnosa zapreminskog protoka vazduha na usisu u određenoj fiksnoj radnoj tački motora, bez i sa uključenim sistemom EGR.



Sl. 2 Instalacija za ispitivanje traktorskog motora DM 34lt (slika levo) i izgled izduvne strane motora (slika desno)

Fig.2 Installation for testing of the tractor engine DM 34lt (fig. left) and a view of the exhaust side of the engine(fig. right)

$$\% EGR = \frac{V_v - V_{v,egr}}{V_v} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

U jednačini su:

V_v - zapreminski protok vazduha na usisu motora bez uključenog EGR sistema

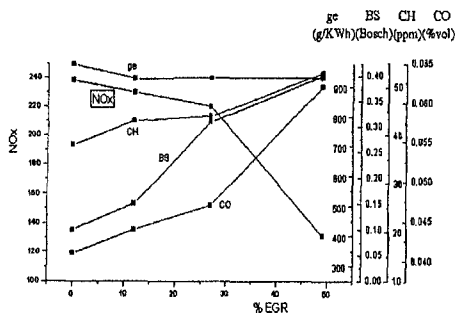
$V_{v,egr}$ -zapreminski protok vazduha na usisu motora sa uključenim EGR sistemom

Analizom gornje jednačine, dolazi se do zaključka da se vrednost EGR odnosa određuje na osnovu činjenice da određena količina recikliranih gasova pri uvođenju u usisni sistem motora, istiskuje srazmernu količinu vazduha zamenjujući njegovo mesto, pri čemu se protok čistog vazduha proporcionalno smanjuje, a što se registruje pomoću protokomera. Tokom istraživanja korišćen je protokomer CUSSONS P7 205/103.

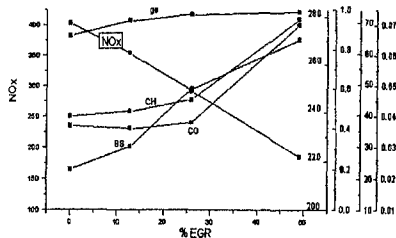
REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

Na slikama koje slede prikazani su delimični rezultati istraživanja uticaja sistema recirkulacije izduvnih gasova na kvalitet i sastav izduvne emisije kao i specifične efektivne potrošnje goriva, sprovedenog na opitnom traktorskom dizel motoru DM34/T. Izvršen je samo prikaz rezultata za nehladjeni EGR i to za dva brzinska režima (1245 o/min i 1800 o/min) i četiri nivoa opterećenja (10%, 30%, 50% i 75%). Prikazani dijagrami daju uporedno ponašanje izduvne emisije azotovih oksida-NO_x, nesagorelih ugljovodonika-CH, ugljenmonoksida-CO, nivoa dimnosti-BS i specifične efektivne potrošnje goriva za navedene brzinske režime i nivoe opterećenja zavisno od EGR stepena.

Kada se radi o nivou redukcije NO_x, sa priloženih dijagrama se može videti da se on za varijantu nehladjenog EGR kreće od 1.7 puta na nižim opterećenjima do oko 2.7 puta na višim. Na režimu najnižeg opterećenja (oko 10%) kao i režimu od 30% opterećenja mogu se zapaziti dosta visoke vrednosti redukcije NO_x uz prihvatljiv nivo dimnosti, čak i u varijanti ovde prezentiranog nehladjenog EGR-a. Na primer na režimu od 1245 o/min i 30% opterećenja redukcija iznosi 2.17 puta, ili oko 54% uz prihvatljiv nivo dimnosti od 0.85 *Bosch* jedinica, ali uz dosta visok EGR odnos od preko 45% (slika 4).



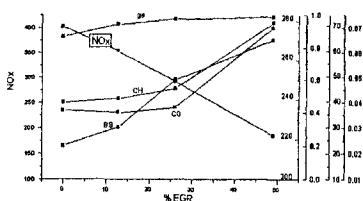
Sl.3 Emisija dima, NO_x, CH, CO i tok spec. efek. potrošnje goriva za 1245 o/min i 10% opterećenja (nehladjeni EGR)
Fig.3 Smoke,NO_x,CH,CO emission and specific fuel consumption for 1245 o/min and 10% load (uncooled EGR)



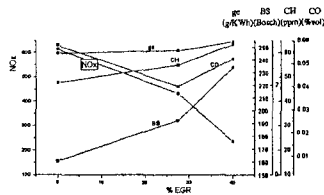
Sl.4 Emisija dima, NO_x, CH, CO i tok spec. efek. potrošnje Goriva za 1245 o/min i 30% opterećenja (nehladjeni EGR)
Fig.4 Smoke,NO_x,CH,CO and specific fuel consumption for 1245 o/min and 30% load (uncooled EGR)

Očigledno je da je dosta mala vrednost dimnosti povezana sa niskim nivoom opterećenja i radom sa velikim koeficijentom viška vazduha, tako da ni EGR odnos od preko 45% ne utiče bitno na povećanje dima. Naravno, ne treba izgubiti iz vida da je relativno povećanje dimnosti u ovom slučaju veoma veliko (više od 4 puta) od 0.2 na 0.85 Bosch jedinica.

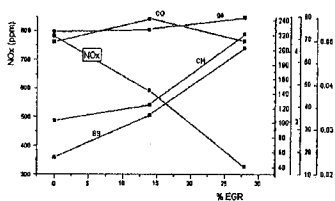
Sa druge strane, ako se posmatra režim najvišeg istraživanog opterećenja pri ovom broju obrtaja (1245 o/min i 75% opterećenja) sl. 6, vidi se da je redukcija emisije NO_x oko 2.4 puta pri nivou recirkulacije od 28%. Treba zapaziti da je postignut vrlo visok stepen redukcije emisije NO_x uz mnogo niži EGR nivo nego u slučaju opterećenja od 30%. Medjutim, nivoi dimnosti su gotovo neprihvatljivo visoki i prelaze 4 bosch jedinice. Slično ponašanje se može zapaziti i na drugom brzinskom režimu, pa se on neće detaljnije analizirati.



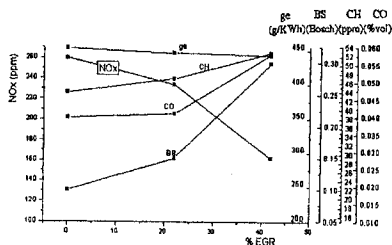
Sl.5 Emisija dima, NO_x, CH, CO i tok spec. efek. potrošnje Goriva za 1245 o/min i 50% opterećenja (nehladjeni EGR)
Fig.5 Smoke,NO_x,CH,CO emission and specific fuel consumption for 1245 o/min and 50% load (uncooled EGR)



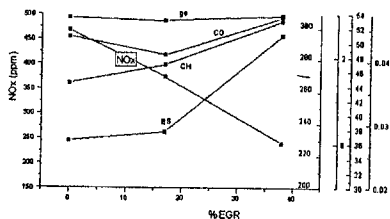
Sl.6 Emisija dima, NO_x, CH, CO i tok spec. efek. potrošnje goriva za 1245 o/min i 75% opterećenja (nehladjeni EGR)
Fig.6 Smoke,NO_x,CH,CO emission and specific fuel consumption for 1245 o/min and 75% load (uncooled EGR)



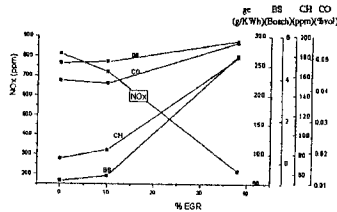
Sl.7 Emisija dima, NO_x, CH, CO i tok spec. efek. potrošnje goriva za 1800 o/min i 10% opterećenja (nehladjeni EGR)
Fig.7 Smoke, NO_x, CH, CO emission and specific fuel



Sl.8 Emisija dima, NO_x, CH, CO i tok spec. efek. potrošnje goriva za 1800 o/min i 30% opterećenja (nehladjeni EGR)
Fig.8 Smoke, NO_x, CH, CO emission and specific fuel



Sl.9 Emisija dima, NO_x, CH, CO i tok spec. efek. potrošnje goriva za 1800 o/min i 50% opterećenja (nehladjeni EGR)
Fig.9 Smoke, NO_x, CH, CO emission and specific fuel consumption for 1800 o/min and 50% load (uncooled EGR)



Sl.10 Emisija dima, NO_x, CH, CO i tok spec. efek. potrošnje goriva za 1800 o/min i 75% opterećenja (nehladjeni EGR)
Fig.10 Smoke, NO_x, CH, CO emission and specific fuel consumption for 1800 o/min and 75% load (uncooled EGR)

Emisija nesagorelih CH i ugljenmonoksida CO se takodje više ili manje povećava sa stepenom EGR. Povećanje emisije CH uglavnom prati tok povećanja dimnosti (emisije čestica), što je i očekivano. Jedan od razloga za ovo je i produženje perioda pritajenog sagorevanja - pps, sa rastom EGR odnosa, a poznata je velika osetljivost emisije CH na dužinu pps. Ugljenmonoksid-CO takodje ima tendenciju porasta, pre svega usled lokalnog nedostatka kiseonika za potpunu oksidaciju.

Kod specifične efektivne potrošnje - g_e može se zapaziti stalno sniženje g_e sa rastom EGR odnosa pri najnižim opterećenjima kod oba brzinska režima, kao i stalni rast g_e sa rastom stepena EGR pri višim i najvišem istraživanom opterećenju. Kod najnižeg nivoa opterećenja motor radi sa izuzetno visokim koeficijentom viška vazduha, tako da bez obzira na stepen EGR nema naročitog pogoršanja uslova sagorevanja. Sa druge strane usled zagrevanja usisnog punjenja EGR gasovima, temperatura radne materije na početku, pa samim tim i na kraju sabijanja je viša što možda dovodi do povećanja udela sagorevanja pri $V_b = const.$ (izohorsko dovodjenje toplote), čime se poboljšava termodinamička efikasnost motora i na taj način malo snižava potrošnja goriva. Kod srednjih i viših nivoa opterećenja može se konstatovati stalni rast, veći ili manji, specifične efektivne potrošnje, sa rastom EGR odnosa verovatno

prouzrokovano pogoršanjem uslova sagorevanja u cilindru, što dovodi do pada ekonomičnosti motora.

ZAKLJUČAK

Na osnovu svih sprovedenih ispitivanja primene sistema EGR na konkretnom istraživanom dizel motoru IMR-DM34/T koji se koristi kao pogonski agregat poljoprivrednih traktora domaće proizvodnje, moguće je konstatovati sledeće:

1. Primenom sistema EGR na istraživanom motoru postiže se veoma visok stepen redukcije azotovih oksida-NOx. U odnosu na bazni nivo (0% EGR) i zavisno od stepena opterećenja motora i stepena recirkulacije, ovo sniženje se kreće od oko 1.7 do oko 2.7 puta.
2. Svaka redukcija NOx, izazvana uvođenjem recikliranih gasova u usis, dovodi do izvesnog povećanja dimnosti motora.
3. Emisija dima na višim opterećenjima je veća nego na nižim za isti stepen EGR.
4. Emisije nesagorelih CH i ugljenmonoksida CO se takodje povećavaju sa rastom EGR odnosa.
5. Specifična efektivna potrošnja goriva - *ge* raste sa povećanjem EGR stepena na svim opterećenjima i oba brzinska režima, osim na najnižem istraženom nivou opterećenja.

LITERATURA

- [1] D. Knežević: Istraživanje radnog ciklusa dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem niske toksične emisije, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2000.
- [2] N. Ladommatos, i dr.: The Effects of Carbon Dioxide in Exhaust Gas Recirculation on Diesel Engine Emissions, Journal of Automobile Engineering, 1998 Vol. 212 No D1
- [3] W. Cadman, i dr.: The Study of the Effect of EGR on Engine Wear in a Heavy-Duty Diesel Engine Using Analytical Ferrography, SAE 860378
- [4] S. Petrović i dr.: Problem toksične izduvne emisije dizel motora, Zbornik preglednih radova, Mašinski fakultet, Beograd, 1997
- [5] P. L. Herzog i dr.: NOx Reduction Strategies for DI Diesel Engines, SAE 920470
- [6] I. Glassman: Combustion, Accademic Press Inc., New York, 1977
- [7] J. B. Heywood: Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, 1988

Rad primljen: 25.9.2002.

Rad prihvaćen: 01.10.2002.