

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

## UTICAJ SISTEMA EGR NA KORELACIJU NO<sub>x</sub>-DIM I NO<sub>x</sub>-HC KOD DIZEL MOTORA SA DIREKTNIM UBRIZGAVANJEM

*Mašinski fakultet u Beogradu*

**IZVOD** Kod praktičnog optimiranja izduvne emisije dizel-motora primenom koncepta EGR (Exhaust Gas Recirculation) od velikog je interesa istražiti korelaciju između emisije azotovih oksida-NO<sub>x</sub> i ostalih toksičnih komponenti. U ovom radu će se prikazati deo dobijenih rezultata korelacije NO<sub>x</sub>-dim i NO<sub>x</sub>-HC, dok emisija ugljenmonoksida-CO nije kod dizel-motora posebno problematična pa se neće bliže analizirati njena promena, a ni korelacija sa ostalim komponentama. Medjuzavisnost emisije NO<sub>x</sub> i dima dobijena tokom ovih istraživanja pokazuje da svako smanjenje koncentracije NO<sub>x</sub> u izduvnim gasovima koje se postiže primenom koncepta EGR, dovodi do većeg ili manjeg rasta dimnosti izduvnih gasova. Primena hladjenja recikliranih gasova može, zavisno od intenziteta tog hladjenja dovesti u određenoj meri do pozitivne promene te korelacije. Hladjenje EGR gasova takodje poboljšava i *trade-off* emisije NO<sub>x</sub>-HC, mada hladjenje dovodi do povećanja emisije nesagorelih HC. Ova činjenica u znatnoj meri komplikuje kao i u slučaju dima, optimiranje navedenog odnosa. Medjutim, naknadni katalitički tretman izduvnih gasova lako redukuje HC komponente.

**KLJUČNE REČI:** dizel motor, recirkulacija izduvnih gasova, izduvna emisija

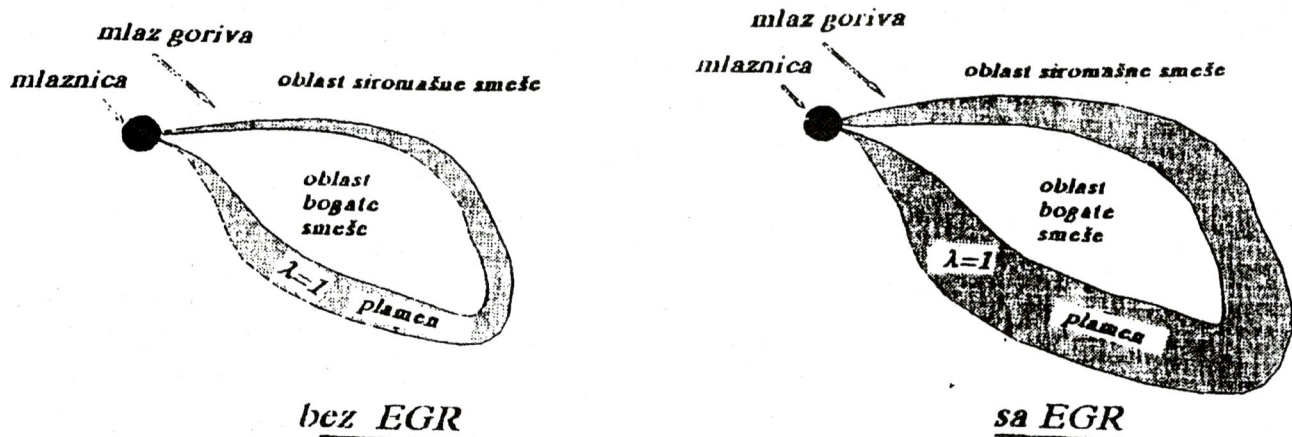
**ABSTRACT** When applying the ERG system in the practical optimisation of diesel engine exhaust emission, the research of the correlation between nitric oxide-NO<sub>x</sub> emission and other toxic components is of great importance. A part of the obtained results of NO<sub>x</sub>-smoke and NO<sub>x</sub>-HC correlation will be presented in this paper, whereas carbonmonoxide-CO emission is not particularly problematic with diesel engines and thus change as well as the correlation with other components will not be analysed in detail. Intercorrelation between NO<sub>x</sub> emission and the smoke obtained in the course of this research shows that every decrease of NO<sub>x</sub> concentration in exhaust gases which is gained by application of EGR-system brings to higher or lower increase in the smokeability of exhaust gases. Application of the recirculated gases cooling, can cause a positive change of that correlation to a certain extent, depending on the intensity of cooling. The cooling of EGR gases also improves the trade-off between NO<sub>x</sub>-HC emissions, though this cooling causes the increase of unburned HC emission. This fact complicates the optimisation of this *trade-off* as well it is the case with smoke. However, the post-catalytic treatment of the exhaust gases reduced HC components easily.

**KEY WORDS:** diesel engine, exhaust gas recirculation, exhaust emission

### 1. UVOD

Konstruktivni koncept sistema recirkulacije izduvnih gasova ili u uobičajenoj oznaci EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) podrazumeva primenu uređaja (podsklopa) na motoru (otto ili dizel ciklusa), koji omogućava uvođenje izvesne količine izduvnih gasova u njegov usisni sistem. Teorijski, laboratorijski i praktično je dokazano da idejni koncept EGR predstavlja jednu od najefikasnijih, najjednostavnijih i najjeftinijih tehnika koje su danas dostupne za bitnu redukciju emisije NO<sub>x</sub> kod *otto* i *dizel* motora. Pri tome se podrazumeva da se ova tehnika, odnosno sistem, aplicira u optimalnoj kombinaciji sa ostalim poznatim metodama koje se primenjuju u cilju daljeg poboljšanja kvaliteta izduvne emisije motora. Kada je reč o dizel motorima poslednje generacije svi

su konstruisani kao motori sa direktnim ubrizgavanjem i visokim pritiscima ubrizgavanja (bilo da je reč o *common rail* sistemima ili sistemu *pumpa-brizgač*). Danas se i dalje ulažu veliki naponi u njihovu konstrukciju i razvoj koji pored propisanog niskog nivoa toksičnosti izduvnih gasova, kao ograničavajućeg faktora, treba da ispune i još dva ključna uslova: još veću ekonomičnost nego danas i istovremeno postizanje visokih performansi. Glavni problem proizvođača ovakvih pogonskih agregata je iznalaženje načina da se uz bitnu redukciju izduvne emisije azotnih oksida ne poveća, ili bar ne značajno, emisija dima, čestica i nesagorelih ugljovodonika-HC, a uz povećanje snage i smanjenje potrošnje goriva motora. Međutim, treba konstatovati da su nažalost pored rešenja izvesnih problema koje sistem recirkulacije izduvnih gasova, a pre svega



Slika 1 Izgled dva mlaza dizel-goriva ubrizgana u sredinu bez (levo) i sa (desno) EGR-gasovima //

koncept hladnog EGR postiže, primećene i neke kontraindikacije primene ovog sistema. Pre svega kod dizel motora dolazi do pogoršanja pravca korelacije između emisije NO<sub>x</sub> i dima i čestica posebno pri visokim opterećenjima kao i nijansiranog pogoršanja specifične efektivne potrošnje goriva. Ipak primenom sistema EGR u kombinaciji sa usavršavanjem motora i elektronskom kontrolom sistema ubrizgavanja navedeni problemi se mogu bitno ublažiti.

## 2. UTICAJ EGR GASOVA NA PROCES U KOMORI MOTORA

Način na koji sistem recirkulacije utiče na sniženje koncentracije NO<sub>x</sub> u izduvnim gasovima dizel-motora sastoji se pre svega u činjenici da EGR gasovi istiskuju određenu količinu vazduha iz usisnog sistema, a koji bi inače dospelo u motor, smanjujući koncentraciju kiseonika u cilindrima. Ovakvo smanjena koncentracija kiseonika dovodi do redukcije brzine sagorevanja, razvlačenja sagorevanja, nižeg maksimuma cilindarskog pritiska i globalno niže srednje temperature ciklusa. S obzirom na veoma veliku osetljivost reakcije formiranja NO<sub>x</sub> na temperaturu procesa, sniženje te temperature u značajnoj meri obara koncentraciju NO<sub>x</sub> u cilindru i izduvnim gasovima.

Sa druge strane specifični toplotni kapacitet usisne smeše EGR gasovi+vazduh se povećava, što kasnije u toku procesa sagorevanja dovodi do veće "potrošnje" toplote oslobođene u procesu sagorevanja na zagrevanje nastalih produkata, nego kada motor radi sa čistim vazduhom, što dodatno obara prosečnu temperaturu ciklusa.

Postavlja se pitanje kako konkretno na nivou procesa koji se dešava u komori motora smanjena koncentracija kiseonika pri nekom EGR odnosu ometa formiranje NO<sub>x</sub> i njegovu emisiju i istovremeno povećava emisiju nesagorelih ugljovodonika – HC, dima i čestica. Moguće objašnjenje potpomognuto slikom 1 sastoji se u sledećem: Procesi i pojave koje se dešavaju u dva mlaza dizel-goriva se razlikuju zavisni od toga da li je gorivo ubrizgano u sredinu u kojoj se ne nalaze (slika levo), ili se nalaze (slika desno) EGR-gasovi. Ako se pretpostavi da se prvo upaljenje goriva dešava u oblasti oboda mlaza u kojoj je približno stehiometrijski odnos vazduh/gorivo ( $\lambda \approx 1$ ) onda je sa slike očigledno da se širina ove oblasti znatno razlikuje zavisno od toga da li je radna materija u

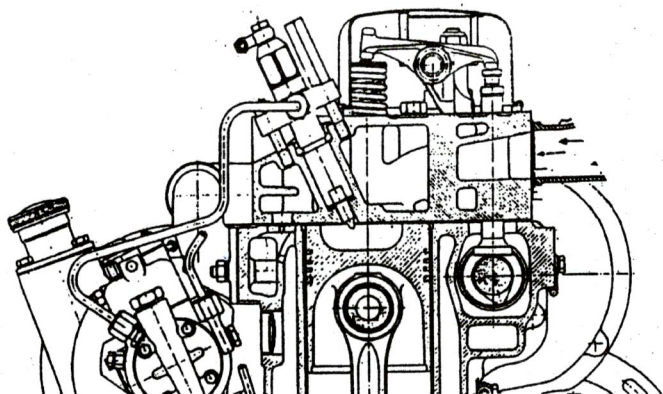
komori sa ili bez EGR gasova. Ako nema recikliranih gasova ova oblast je uža. Međutim, kada se u cilindar uvedu EGR gasovi (CO<sub>2</sub> + vodena para), ubrizgana količina goriva je prinudena da se difuzno proširi po širem području komore, pre nego što se dovoljno kiseonika iz okolne smeše uključi u proces formiranja stehiometrijskog odnosa gorivo/vazduh i pojave prvih centara upaljenja (slika 1 desno). Zbog toga se na obodu mlaza formira šira oblast isparelog goriva u kojoj će se pojaviti stehiometrijski odnos sa približno  $\lambda=1$ , ali u kojoj se sada nalaze i odgovarajuće količine gasova CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> i vodene pare. Dodatne količine ovih inertnih gasova većeg toplotnog kapaciteta, apsorbuju energiju koja se oslobađa sagorevanjem, vodeći na taj način nižim temperaturama plamena u ovoj stehiometrijskoj oblasti, pa tako i nižem stepenu formiranja NO<sub>x</sub>.

Iz prethodne analize je verovatno moguće objasniti i produženje perioda pritajenog sagorevanja - pps sa povećanjem EGR stepena. Naime, od trenutka dospeća prvih čestica goriva u komoru pa do pojave prvih centara upaljenja protekne više vremena zbog teže dostupnosti kiseonika i njegovog sporijeg i težeg ulaska u zonu reakcije. Ovo je jedan od razloga zbog koga se povećava emisija HC pri radu motora sa EGR, jer je dobro poznata i istražena činjenica da se emisija nesagorelih HC intenzivira pri produženju perioda pritajenog sagorevanja.

Kada je reč o dimnosti, sopstvena istraživanja su pokazala da se sa povećanjem EGR odnosa na svim režimima opterećenja i pri svim brojevima obrtaja – dimnost izduvnih gasova motora povećava. Poznata je činjenica da je gledano po fazama procesa sagorevanja, treća faza najkritičnija jer se tokom nje pod dejstvom visokih temperatura i zbog otežanog pristupa kiseonika u zonu reakcije, ugljovodonični molekuli dizel-goriva, raspadaju formirajući čisti ugljenik u obliku čestica čađi. Pri radu sa EGR ovaj problem trećeg perioda sagorevanja se još više potencira po pitanju pojačane emisije dima i čestica, jer je pristup kiseonika u zonu reakcije sa ugljovodoničnim gorivom dodatno otežan, a i količina kiseonika je manja, jer je deo usisnog vazduha istisnut i zamenjen sa EGR gasovima. Tako da na relativno veliko povećanje emisije dima i čađi sa visokim EGR odnosima, verovatno utiče i značajno smanjenje temperature plamena, što redukuje procese naknadne oksidacije čađi u postplamenoj zoni tokom procesa sagorevanja.

### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

U cilju eksperimentalnog istraživanja uticaja recirkulacije izduvnih gasova na promenu sadržaja glavnih toksičnih komponenti izduvne emisije, pa samim tim i na tok korelacije komponenti NO<sub>x</sub>-dim i NO<sub>x</sub>-HC, 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. Konkretno, radi se o usisnom dizel-motoru sa direktnim ubrizgavanjem tipa IMR-DM 34/t, čiji je poprečni presek kroz prostor sagorevanja prikazan na slici 2.

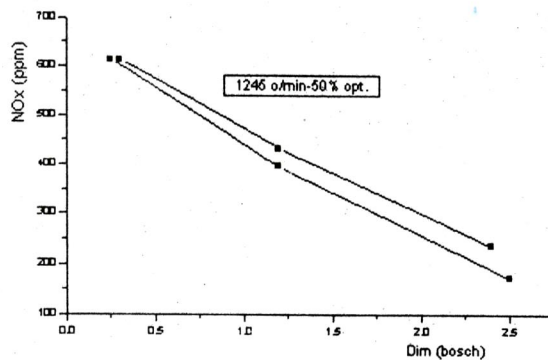


Slika 2 Presek kroz prostor sagorevanja ispitivanog dizel-motora sa direktnim ubrizgavanjem IMR-DM 34/t

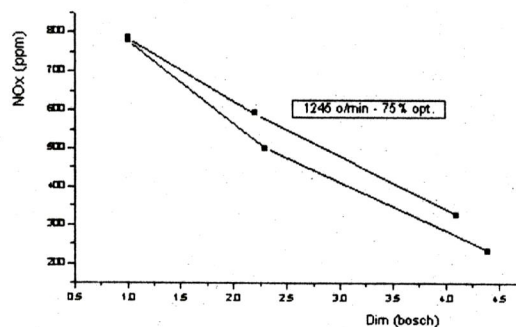
Na slikama koje slede dati su delimični rezultati istraživanja uticaja nehladenog i hladnog EGR na korelaciju (*trade-off*) glavnih toksičnih komponenti dizel-motora, NO<sub>x</sub>-dim i NO<sub>x</sub>-HC. Merenja su vršena na četiri brzinska režima (1245o/min, 1470o/min, 1600o/min, 1800o/min) i četiri nivoa opterećenja od oko (10%, 30%, 50%, 75%). Istraženo je ukupno 32 radna režima sa preko 100 tačaka u pogledu EGR odnosa. Ovde će biti prikazani rezultati toka korelacije za samo nekoliko karakterističnih slučajeva i to uporedo za nehladeni i hladni sistem recirkulacije, da bi se lakše pratio efekat hlađenja EGR gasova na tok navedenih korelacija. Prikazani dijagrami daju uporedno ponašanje predmetnih međuzavisnosti toksičnih izduvnih komponenti za izabrane brzinske režime i nivoe opterećenja zavisno od EGR stepena. Tok promene emisije ugljenmonoksida-CO, kao i njegova korelacija sa ostalim komponentama, ovde neće biti prikazana, jer je emisija CO komponente kod dizel-motora inače niska.

Na slikama 3 do 6 prikazana je međusobno povezana promena NO<sub>x</sub> i dima za dva ispitana brzinska režima na po dva nivoa opterećenja (50% i 75%) bez hlađenja i sa hlađenjem recikliranog gasa. Vidi se da je kod motora DM 34/t moguće veoma bitno redukovati emisiju NO<sub>x</sub> komponente ali uz znatno povećanje dimnosti. Treba međutim konstatovati da hlađenje recikliranih izduvnih gasova dovodi do izvesnog poboljšanja korelacije i pada nivoa NO<sub>x</sub> i dima sa stepenom EGR.

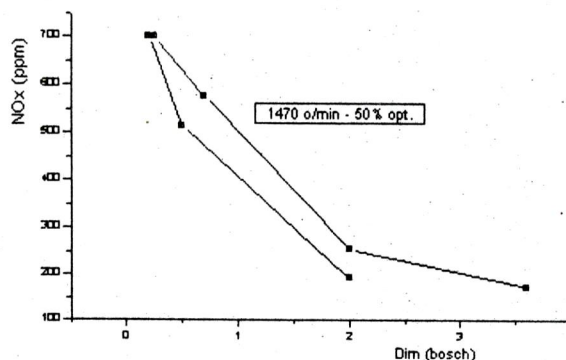
Ranije je već napomenuto, a na slici 7 se može videti, da se emisija nesagorelih ugljovodonika-HC sa povećanjem EGR odnosa konstantno povećava i uglavnom u tom rastu prati emisiju dima, što nije prikazano. Međutim, interesantno je zapaziti da kod nesagorelih ugljovodonika postoji negativan efekat hlađenja EGR gasova.



Slika 3 Korelacija NO<sub>x</sub>-dim u nehladenoj (gornja linija) i hladenoj (donja linija) varijanti EGR, 1245 o/min, 50% opterećenja //



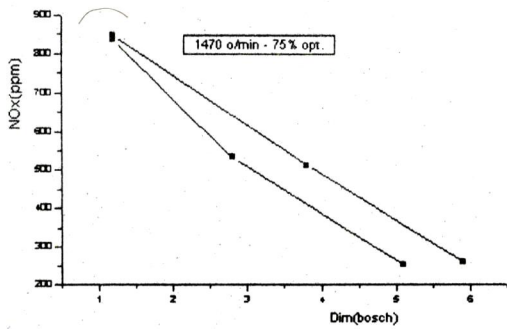
Slika 4 Korelacija NO<sub>x</sub>-dim u nehladenoj (gornja linija) i hladenoj (donja linija) varijanti EGR, 1245 o/min, 75% opterećenja //



Slika 5 Korelacija NO<sub>x</sub>-dim u nehladenoj (gornja linija) i hladenoj (donja linija) varijanti EGR, 1470 o/min, 50% opterećenja //

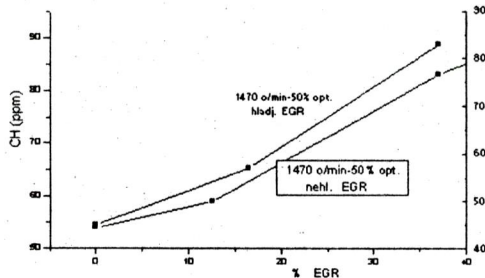
Dijagrami pokazuju da je emisija HC komponente nešto veća u varijanti hladnog EGR nego u varijanti nehladenog. Verovatni razlog ovog povećanja je u tome što se hlađenjem recikliranih gasova postiže nešto niža temperatura usisne smeše (tokom

eksperimenta mereno u usisnoj grani), što dovodi do izvesnog povećanja perioda pritajenog sagorevanja, na šta je emisija nesagorelih HC veoma osetljiva. Korelacija NOx-HC prikazana je na slikama 8 i 9. Može se zapaziti da je ova korelacija u varijanti hladnog EGR pozitivna iako hlađenje, kao što je ranije prikazano, dovodi do povećanja emisije nesagorelih HC.

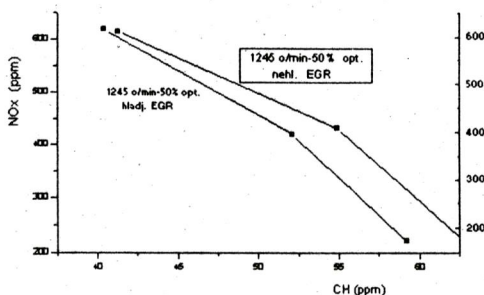


Slika 6 Korelacija NOx-dim u nehladenoj (gornja linija) i hladenoj (donja linija) varijanti EGR, 1470 o/min, 75% opterećenja //

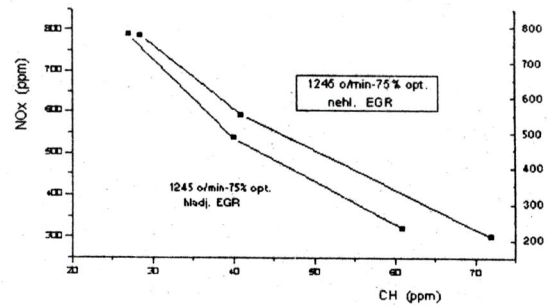
Na prikazanom brzinskom režimu na dva nivoa opterećenja može se zapaziti da hlađenje EGR gasova dovodi do toga da je za isti nivo HC emisija NOx niža, dok je za isti nivo NOx emisija HC viša. Ova činjenica u znatnoj meri komplikuje optimiranje navedenog odnosa. Međutim naknadni katalitički tretman izduvnih gasovodukuje HC komponente.



Slika 7 Emisija nesagorelih HC zavisno od % EGR za 1470 o/min, 50% opterećenja //



Slika 8 Emisija nesagorelih HC zavisno od % EGR za 1245 o/min, 50% opterećenja //



Slika 9 Emisija nesagorelih HC zavisno od % EGR za 1245 o/min, 75% opterećenja //

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih istraživanja uticaja primene nehladenog i hladnog sistema EGR na tok korelacije NOx-dim i NOx-HC, na konkretnom ispitivanom dizel-motoru sa direktnim ubrizgavanjem IMR-DM 34/t, moguće je konstatovati sledeće:

1. Primenom sistema EGR 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 i do 2.7 puta.
2. Emisija nesagorelih HC i dima se povećavaju sa rastom EGR stepena pri čemu hlađenje EGR gasova snižava emisiju dima i NOx ali zato povećava emisiju nesagorelih HC
3. Svako smanjenje koncentracije NOx u izduvnim gasovima koje se postiže primenom koncepta recirkulacije izduvnih gasova, dovodi do većeg ili manjeg rasta dimnosti i emisije HC u izduvnim gasovima.
4. Primena hlađenja recikliranih gasova može, zavisno od intenziteta tog hlađenja dovesti u određenoj meri do pozitivne promene te korelacije.

#### LITERATURA

- /1/ D. Knežević: Istraživanje radnog ciklusa dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem niske toksične emisije, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2000.
- /2/ D. Knežević, i dr.: Uticaj hlađenja EGR na kvalitet izduvne emisije dizel-motora, Naučno-stručni skup NMV '01, Beograd 2001, YU-01160
- /3/ D. Knežević, i dr.: Primena recirkulacije izduvnih gasova kod dizel-motora, Međunarodni naučni simpozijum MVM 2000, Kragujevac 2000, YU-00062
- /4/ N. Ladommatos i dr.: Effects of Exhaust Gas Recirculation Temperature on Diesel-Engine Combustion and Emissions, Journal of Automobile Engineering, Vol 212
- /5/ I. Glassman: Combustion, Accademic Press Inc., New York, 1977
- /6/ J. B. Heywood: Internal Combustion Engine Fundamentals, New York, 1988