

UTICAJ HLADJENJA EGR NA KVALITET IZDUVNE EMISIJE DIZEL MOTORA

Mr. D. Knežević, *Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*
 Prof. Dr. S. Petrović, *Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*
 Mr. M. Matejić, *Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*
 Mr. S. Popović, *Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu*



IZVOD U radu se daju rezultati eksperimentalnog istraživanja uticaja recirkulacije izduvnih gasova-EGR, sa medjuhlađenjem tih gasova pre uvodjenja u usisni sistem, na kvalitet izduvne emisije dizel-motora sa direktnim ubrizgavanjem-IMR DM34/T. Prikazani su uporedni rezultati istraživanja efekta nehladjenog i hladjenog sistema EGR na tok i promenu osnovnih toksičnih komponenti u izduvnim gasovima dizel-motora (NOx, HC, CO i dima), kao i specifične efektivne potrošnje goriva, zavisno od količine recikliranih gasova, odnosno EGR odnosa, broja obrtaja i opterećenja. Primenom sistema hladjenog EGR na istraživanom motoru moguće je postići dalje povećanje stepena redukcije azotovih oksida uz izvesno sniženje rasta dimnosti motora. Takođe, hladjeni EGR dovodi do relativno malog porasta emisije nesagorelih HC i specifične efektivne potrošnje goriva u odnosu na nehladjenju varijantu sistema.

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

1. UVOD

Sistem recirkulacije izduvnih gasova ili skraćeno EGR (Exhaust Gas Recirculation) podrazumeva koncept primene uređaja (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. Kada je reč o dizel motorima najnovije generacije, poznato je da su praktično svi koncipirani kao motori sa direktnim ubrizgavanjem i visokim pritiscima ubrizgavanja (bilo da je reč o *common rail* sistemima ili sistemu *pumpa brizgač*). Veliki naponi se i dalje ulažu da bi se konstruisali dizel motori nove generacije, a koji bi ispunjavali tri ključna uslova: što nižu toksičnost izduvne emisije; još veću ekonomičnost nego danas i istovremeno postizanje visokih performansi. Glavni problem proizvođača ovakvih pogonskih agregata danas je pronalaženje načina da se redukuje izduvna emisija azotnih oksida, bez povećanja emisije čestica, a uz povećanje snage i smanjenje potrošnje goriva motora. Sistem recirkulacije izduvnih gasova, a pre svega koncept hladjenog EGR, u kombinaciji sa usavršavanjem motora i elektronskom kontrolom sistema ubrizgavanja, u velikoj meri rešava ovaj problem /2/.

2. UTICAJ EGR GASOVA NA USISNO PUNJENJE

Deo izduvnih gasova koji se sistemom recirkulacije vraća na usisnu stranu motora i pomešan sa vazduhom uvodi u cilindre, modifikuje usisno punjenje dizel motora na tri načina:

1. Temperatura punjenja raste
2. Ukupna masa punjenja se smanjuje
3. Sastav punjenja se menja

Prisustvo određene količine izduvnih gasova u usisnom punjenju dizel motora može bitno uticati kako na proces sagorevanja, tako i na koncentraciju toksičnih komponenti u izduvnim gasovima, i to iz dva glavna razloga.

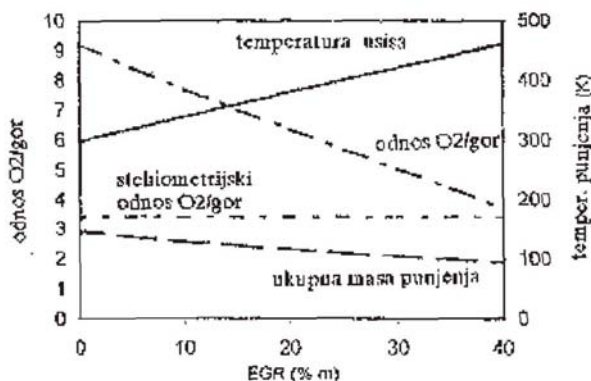
Toplotni kapacitet usisnog punjenja sa EGR gasovima je viši od onog koji bi postojao ako bi motor usisavao čist vazduh. To pri radu motora dovodi do povećane "potrošnje" toplote razvijene procesom sagorevanja na zagrevanje cilindarskih gasova, što s obzirom da proces formiranja NOx eksponencijalno zavisi od temperature, dovodi do značajnog sniženja nivoa emisije ove komponente. Medjutim, što je temperatura usisnog punjenja viša dolazi do veće redukcije u njegovoj masi, i smanjenja toplotnog kapaciteta, što rezultira u nešto višim temperaturama procesa sagorevanja.

Takođe, EGR gasovi zamenjuju ekvivalentnu zapreminu vazduha u usisu čime se smanjuje količina kiseonika u svežem punjenju. Slika 1 pokazuje promenu temperature usisa, odnosa *kiseonik/gorivo* i promenu ukupne mase punjenja zavisno od količine recikliranih gasova.

Smanjenje kiseonika potencijalno dostupnog za sagorevanje nastaje kako usled redukcije ukupne mase punjenja, tako i zbog istiskivanja određene količine vazduha EGR gasovima. Na slici 1 se vidi da je pri 20% (po masi) EGR gasova, maseni odnos $O_2 / gorivo$ oko 6.3:1 što je ekvivalentno masenom odnosu *vazduh / gorivo* od oko 25:1 bez učešća EGR.

Ova slika takođe pokazuje da masa radne materije koja je ostala u cilindru do početka kompresije, opada za oko 26% kada se udeo EGR poveća od 0% do 25% (maseno). Zato neki autori /3/ skreću pažnju da upotreba EGR treba da bude ograničena na oko 25% pošto bi viši nivoi smanjili odnos $O_2 / gorivo$ ispod onog koji postoji u motoru pri radu na punom opterećenju bez EGR. Viši nivoi od 25% (po masi) se

moгу primenjivati kod manjih opterećenja kada redovno postoji veliki višak vazduha (kiseonika) koji je potencijalno dostupan za sagorevanje goriva u cilindru.

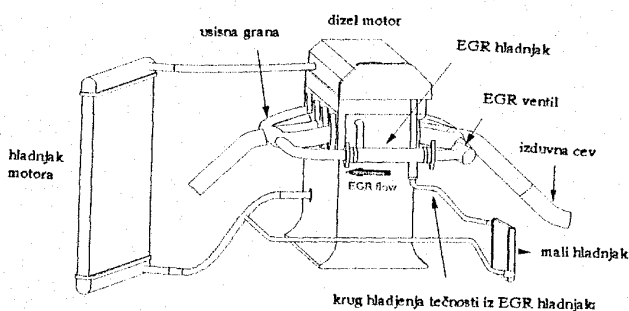


Sl. 1 Efekat povećanja stepena EGR na usisno punjenje /3/

Na kraju, kao što je već napomenuto, mešanje izduvnog gasa sa ulaznim vazduhom značajno menja sastav usisnog punjenja u poredjenju sa vazduhom. Ovo je zbog toga što EGR sadrži značajnu koncentraciju CO_2 i vodene pare, uz redovan sadržaj azota i kiseonika u struji čistog vazduha. U krajnjem rezultatu sveža radna materija poseduje nižu koncentraciju O_2 nego čist vazduh, otprilike sličnu koncentraciju azota i naravno veći ili manji sadržaj ugljen-dioksida i vodene pare. Redukcija količine kiseonika ima glavni uticaj na sagorevanje i kvalitet izduvne emisije. Primećeno je da dolazi do srazmerno visokog povećanja količine čadji, stvorene sagorevanjem, koja ne oksidiše uz bitnu redukciju u formiranju NO_x -oksida. Da bi se u izvesnoj meri ublažili negativni efekti koje prouzrokuje uvođenje vrelih recikliranih izduvnih gasova u usisni sistem motora poželjno je primeniti hlađenje tih gasova na njihovom putu od izduva ka usisu.

2.1 Konceptija i rad sistema hlađenja EGR

U osnovi postupak hlađenja EGR gasova je dosta jednostavan, mada se prvi hlađeni EGR primenjen u komercijalne svrhe pojavio tek u skorije vreme /2/. Načelna šema hlađenja recikliranih izduvnih gasova prikazana je na slici 2. Prikazan je sistem hlađenja tečnost-gas kao znatno efikasniji od sistema vazduh-gas. Na slici se dalje vidi tok strujanja, kako EGR gasova, tako i tečnosti koja ih hladi. Radi se o integralnom sistemu hlađenja motora i hlađenja EGR gasova, jer ovakav sistem omogućava najkompaktnije i najekonomičnije rešenje.



Sl.2 Načelna šema hlađenja recikliranih izduvnih gasova /2/

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

U cilju eksperimentalnog istraživanja uticaja primene hlađenog sistema recirkulacije izduvnih gasova na promenu sadržaja glavnih toksičnih komponenti izduvne emisije, kao i specifične efektivne potrošnje goriva 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.

Takodje, cilj ispitivanja je bio da se utvrdi efekat hlađenog EGR u odnosu na nehladjeni, na nivo emisije i potrošnje goriva zavisno od radnog režima motora, odnosno brzine ciklusa i opterećenja. Na osnovu dobijenih rezultata mogu se doneti zaključci o efektu primenjenog sistema hlađenog EGR na nivo redukcije toksičnih komponenti, a na osnovu analize nivoa redukcije i rasta emisije po komponentama proceniti opravdanost primene ovog sistema na konkretnom motoru. Sam sistem recirkulacije sa hlađenjem EGR gasova, šematski je prikazan na slici 3. Sistem recirkulacije je sadržao dve EGR grane kao što se vidi na slici.

Prva se sastojala od cevi većeg unutrašnjeg prečnika (30 mm), a druga od cevi manjeg unutrašnjeg prečnika (10 mm). Hladnjak tipa voda-gas je bio ugrađen na EGR tok većeg prečnika (poz. 5). Regulacija protoka gasa kroz veću cev vršena je pomoću loptaste slavine (poz. 1), a kroz manju pomoću ventila zasunskog tipa (poz. 2).

Temperatura punjenja (smeša vazduh+izduvni gasovi) u usisnoj grani motora, merena je pomoću davača temperature usisne smeše (poz. 6), koji je bio urađen umesto grejača usisnog vazduha.

Da bi se ispitalo efekat recirkulacije izduvnih gasova kako u nehladjenoj tako i u hlađenoj varijanti, na promenu sastava izduvne emisije i specifične efektivne potrošnje goriva, 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 CO_2 u izduvnom i usisnom traktu motora.

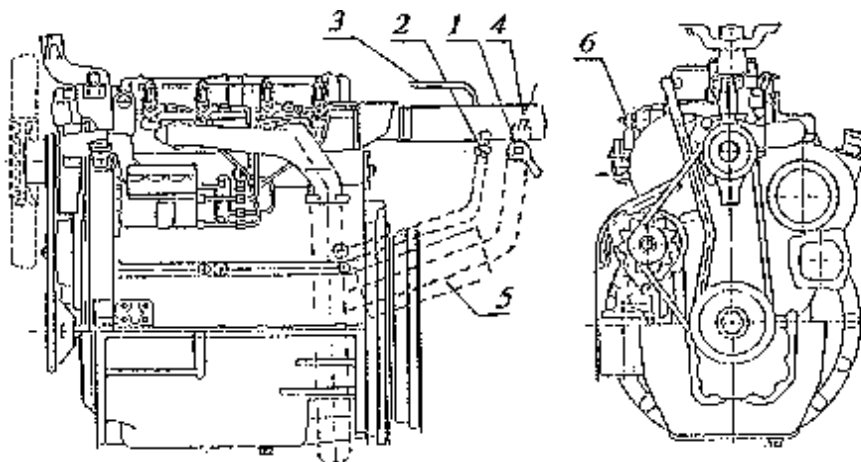
Zapreminska definicija je veoma pogodna jer se količina EGR gasova definiše kao procentualno smanjenje odnosa zapreminskog protoka vazduha na usisu u određenoj fiksnoj radnoj tački motora, bez i sa uključenim sistemom EGR.

$$\% EGR = \frac{V_v - V_{v,egr}}{V_v} \times 100 \quad [\%] \quad \text{gde su:}$$

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

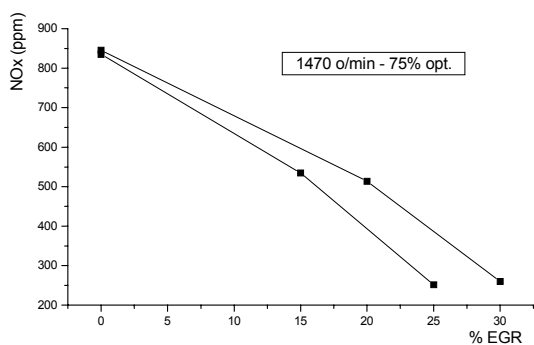
Analizom gornjeg izraza, dolazi se do zaključka da se vrednost EGR odnosa određuje na osnovu činjenice da određena količina recikliranih gasova pri uvođenju u usisni sistem motora, istiskuje srazmernu količinu vazduha zamenjujući njegovo mesto, pri čemu se protok čistog vazduha proporcionalno smanjuje,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



Sl. 3 Uprošćeni šematski prikaz EGR sistema na motoru IMR DM34/T/1/

4. REZULTATI ISPITIVANJA

Na slikama koje slede prikazani su delimični rezultati istraživanja uticaja hladjenog sistema EGR na kvalitet i sastav izduvne emisije kao i specifične efektivne potrošnje goriva. Merenja su vršena na četiri brzinska režima (1245 o/min, 1470 o/min, 1600 o/min i 1800 o/min) i četiri nivoa opterećenja od oko (10%, 30%, 50% i 75%). Istraženo je ukupno 32 radna režima sa preko 100 tačaka u pogledu EGR odnosa. Ovde će biti prikazani rezultati toka komponenti NO_x, HC, dima i spec. ef. potrošnje goriva za samo četiri karakteristična slučaja i to uporedno za nehladjeni i hladjeni sistem recirkulacije, da bi se lakše pratio efekat hladjenja EGR gasova na tok navedenih veličina. Prikazani dijagrami daju uporedno ponašanje izduvne emisije azotovih oksida - NO_x, nesagorelih ugljovodonika - HC, nivoa dimnosti i spec. efekt. potr. goriva za izabrane brzinske režime i nivoe opterećenja zavisno od EGR stepena. Tok promene emisije ugljenmonoksida - CO ovde neće biti prikazan, jer je emisija CO komponente kod dizel motora inače niska.

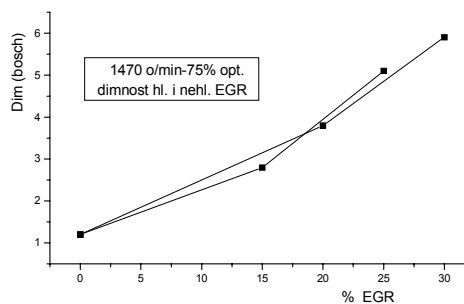


Sl. 4 Emisija NO_x za nehladjenju (gornja linija) i hladjenju (donja linija) varijantu EGR /1/

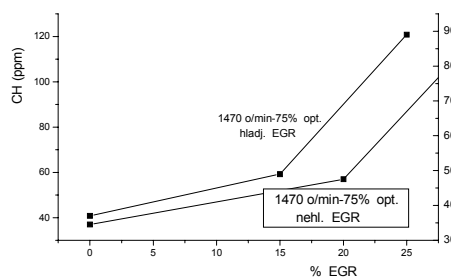
Ispitivanjem na motoru DM 34/T je utvrđeno da hladjenje recirkiranog gasa doprinosi daljem sniženju glavnih dizel-emisija NO_x i dima. Na slikama 4 i 5 prikazan je tok NO_x i dima za nehladjenju (gornja linija) i hladjenju (donja linija) varijantu EGR za 1470 o/min i najviši istraženi nivo opterećenja od 75% zbog naročito izraženog problema NO_x

emisije i dimnosti dizel motora upravo pri višim opterećenjima.

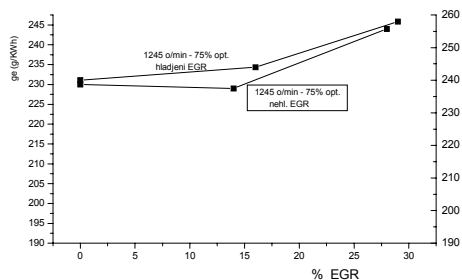
U oba navedena slučaja, vidljivo je da prilikom primene nehladjenog (vrućeg) EGR, svako smanjenje emisije NO_x postignuto povećanjem količine recirkuliranih gasova dovodi do veoma bitnog rasta nivoa dimnosti izduvni gasova u "bosch" jedinicama. Slike takodje prikazuju da se hladjenjem EGR gasova postiže dalja redukcija obe komponente. Pri datom nivou hladjenja EGR, izduvna emisija NO_x je značajno smanjena, dok je u isto vreme i emisija dima (čadji) takodje smanjena. Napominje se da je zbog primene neadekvatnog hladnjaka EGR gasova, temperatura hladjenog EGR u odnosu na nehladjeni bila niža svega oko 40° C u proseku za približno isti EGR nivo.



Sl. 5 Dimnost motora za hladjenju (donja lin.) i nehladjenju (gornja linija) EGR /1/



Sl. 6 Emisija nesagorelih HC zavisno od %EGR /1/



Sl. 7 Tok specifične efektivne potrošnje goriva za hladjeni (gornja lin.) i nehladjeni (donja lin.) EGR /1/

Medjutim, čak i pri tako maloj temperaturskoj razlici ostvareno je prilično očigledno sniženje NOx emisije. Sa dijagrama se vidi da praktično nije bio prekoračen nivo od 25% do 30% EGR stepena. Hladjenje je zavisno od slučaja redukovalo emisiju azotovih oksida u proseku 28% u odnosu na slučaj bez hladjenja. S obzirom na prilično slab intenzitet hladjenja, ova redukcija nije zanemarljiva. Kod nivoa dimnosti redukcija je očigledno znatno manja pa su i linije toka dimnosti veoma bliske. Medjutim treba napomenuti da istraživani motor inače ima problem pojačanog dimljenja i u varijanti bez sistema EGR. Istraživanjem je utvrđeno da se emisija nesagorelih ugljovodonika - HC sa povećanjem EGR stepena konstantno povećava i uglavnom u tom rastu prati emisiju dima. Interesantno je zapaziti (slika 6) da za razliku od intenziteta dimnosti koji se snižava hladjenjem EGR gasova, kod nesagorelih HC postoji upravo suprotan efekat. Na slici 6 može se videti da je emisija HC nešto veća u varijanti hladjenog EGR nego u varijanti nehladjenog.

To povećanje nije veliko ali se mora zapaziti i konstatovati. Dijagrami prikazani na slici odnose se na brzinski režim 1470 o/min i opet za najviši istraženi nivo od oko 75% opterećenja. Verovatni razlog povećanja emisije HC je u tome što se hladjenjem EGR gasova postiže nešto niža temperatura usisne smeše (mereno u usisnoj grani), što dovodi do izvesnog produženja perioda pritajenog sagorevanja, na šta je emisija nesagorelih HC veoma osetljiva.

Slika 7 pokazuje promenu specifične efektivne potrošnje goriva zavisno od intenziteta hladjenja recikliranih gasova, za brzinski režim 1245 o/min i 75% opterećenja. Sa slike se

može zapaziti da hladjenje EGR gasova ima negativan efekat na spec. ef. potrošnju, tako što je povećava. Ovo povećanje dolazi najverovatnije otuda što se hladjenjem recikliranih gasova, a samim tim i usisnog punjenja produžava period pritajenog sagorevanja i proces sagorevanja se razvlači na takt ekspanzije čime se smanjuje termodinamička efikasnost motora što u maloj meri dovodi do povećanja specifične efektivne potrošnje goriva. Takođe ne treba zanemariti ni činjenicu da dolazi do bitnog pogoršanja uslova sagorevanja u cilindru.

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenih ispitivanja primene sistema hladjenog EGR na konkretnom istraživanom dizel motoru IMR-DM34/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 istepena recirkulacije, ovo sniženje se kreće i do 2,7 puta.
2. Emisija nesagorelih HC i dima se povećavaju.
3. Hladjenje recikliranih izduvnih gasova dovodi do dalje redukcije NOx emisije kao i relativnog sniženja dimnosti motora, pri čemu obe redukcije uglavnom zavise od intenziteta hladjenja.
4. Specifična efektivna potrošnja goriva raste sa povećanjem EGR stepena, osim na najnižem istraženom nivou opterećenja.
5. Primenom sistema hladjenog EGR primećen je relativni rast emisije nesagorelih HC i spec. ef. potrošnje goriva.

6. LITERATURA

- /1/ D. Knežević: Istraživanje radnog ciklusa dizel motora sa direktnim ubrizgavanjem niske toksične emisije, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2000.
- /2/ H. Laudic: Performance of EGR Cooling on Direct Injection Diesel Engine, Valeo Thermique Moteur, 1999.
- /3/ N. Ladommatos i dr.: Effects of Exhaust Gas Recirculation Temperature on Diesel Engine Combustion and Emissions, Journal of Automobile Engineering, Vol 212