

## MOGUĆNOSTI SMANJENJA EMISIJE ŠTETNIH SASTOJAKA DIELOVIH MOTORA ZA EURO 6

Prof.dr.sc Josip Zavada

### UVOD

Smanjenje emisije štetnih sastojaka prijevoznih sredstava nameće se nužnim zbog zaštite okoliša pa se stoga donose zakonske norme kojima se ograničavaju dopuštene emisije. Paralelno s tim zahtjevom traži se i smanjivanje potrošnje goriva da bi se općenito smanjila potrošnja energije po jedinici obavljenog rada te smanjila emisija CO<sub>2</sub> kao jednog od uzročnika stvaranja efekta staklenika.

Dopuštene vrijednosti emisije štetnih sastojaka propisuju se normama koje imaju komercijalne nazive Euro. Svaka nova norma donosi niže vrijednosti dopuštene emisije. Pa tako i Euro 6 norma predviđa izrazito veliko smanjenje dopuštenih vrijednosti emisije. Za teška teretna vozila s Dieselovim motorom, prema Euro 6 normi, predviđaju se dopuštene vrijednosti od 0,4 g/kWh za NO<sub>x</sub>, što je čak za 80 % manje u odnosu na Euro 5 normu (2,0 g/kWh), a 0,01 g/kWh za čestice, što je za 50 % manje u odnosu na Euro 5 normu (0,02 g/kWh), uz provođenje ciklusa European Stationary Cycle (ESC) i European Transient Cycle (ETC). Prema prijedlogu Europskog vijeća, Euro 6 norma trebala bi se početi primjenjivati od 1. rujna 2014. godine za odobrena vozila (novi modeli), a od 1. siječnja 2015. godine za sva nova vozila.

Tako veliko smanjenje emisije dušičnih oksida i čestica u Dieselovih motorima izuzetno je težak zadatak za proizvođače motora. Oni u suradnji sa znanstvenicima intenzivno rade na rješavanju problema daljnjeg smanjenja emisije dušičnih oksida i čestica. Rješenja koja se iznalaze zahtijevaju vrlo složenu opremu što ima za posljedicu povećanje cijene i moguće smanjenje pouzdanosti tijekom eksploatacije. Složenija vozila zahtijevaju i dodatno opremanje servisnih radionica i osposobljavanja osoblja koje će raditi na održavanju takvih vozila.

### MOGUĆA RJEŠENJA ZA POSTIZANJE TRAŽENOG SMANJENJA EMISIJE ŠTETNIH SASTOJAKA

Za smanjenje emisije štetnih sastojaka ispušnih plinova u osnovi su na raspolaganju tri mjere, a to su selektivna katalitička redukcija, vraćanje ispušnih plinova i primjena pročištača čestica. Proizvođači pristupaju primjeni pojedinih mjera kako bi postigli vrlo niske granice dopuštene emisije prema Euro 6 normi. Međutim, sustav postaje vrlo složen i skup, kako za proizvodnju tako i za održavanje.

Vrlo efikasna mjera za smanjenje emisije dušičnih oksida je selektivna katalitička redukcija uz dodavanje redukcijskog sredstva (npr. amonijak, vodena otopina uree,...) ispred katalizatora. U takvom sustavu ne predviđa se vraćanje ispušnih plinova. Takvu mjeru primjenjuje većina proizvođača teretnih vozila za ispunjavanje Euro 4 i Euro 5 norme.

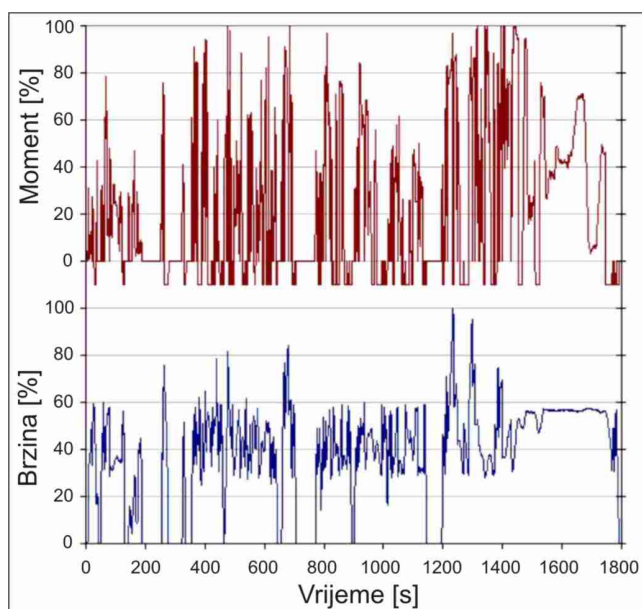
Neki proizvođači za ispunjavanje istih normi koriste vraćanje ispušnih plinova i pročištače čestica, čime se izbjegava korištenje dodatnog katalitičkog sredstva. Takvim rješenjem teško se ostvaruju granice propisane Euro 6 normom. Naime, za to je potrebno vrlo veliko vraćanje ispušnih plinova, koje pri punom opterećenju može biti do 40 %. Da bi se pri tako velikom vraćanju ispušnih plinova osigurao potreban omjer goriva i zraka, mora se primijeniti prednabijanje s visokim tlakom, koji se obično ne može postići s jednostupnjevitim prednabijanjem. Prednabijanje s visokim tlakom dovodi do vrlo visokih vršnih tlakova u cilindru motora, što mehanički znatno opterećuje sam motor. To rješenje također zahtijeva učinkoviti uređaj za hlađenje, kako ispušnih plinova koji se vraćaju u cilindre, tako i samog motora. Daljnji nedostatak tog rješenja predstavlja povećanje emisije čestica pa je za ublažavanje problema nužna primjena Common-Rail uređaja za napajanje gorivom. Unatoč tome, i

dalje je nastala količina čestica velika, što značajno opterećuje pročistač čestica.

### Kombinacija katalizatora i pročistača čestica

Optimizacijom mjera selektivne katalitičke redukcije i pročistača čestica, bez vraćanja ispušnih plinova, moguće je postići postavljeni cilj smanjenja emisije štetnih sastojaka do vrijednosti propisanih Euro 6 normom. Izostavljanjem vraćanja ispušnih plinova smanjuje se potrošnja goriva i emisija čestica te zahtjevi prema pročistaču čestica i uređaju za hlađenje.

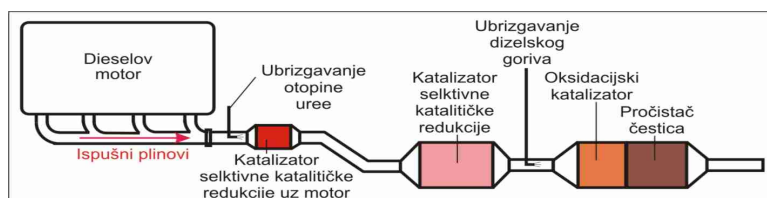
Za mjerenje emisije štetnih sastojaka prema Euro 6 normi, pored European Stationary Cycle (ESC) i European Transient Cycle (ETC), predviđa se i provođenje World Harmonized Transient Cycle (WHTC), koji uzima u obzir i hladni start. Tim ciklusom željelo se što je moguće vjernije reprezentirati stvarne režime komercijalnih vozila. On objedinjuje tipične uvjete vožnje u EU, USA, Japanu i Australiji. Test se provodi na dinamometru, a predviđa prijelazne režime u trajanju od 1800 s. Shematski prikaz relativne promjene brzine vrtnje i okretnog momenta dan je na slici 1.



**Slika 1.** Shematski prikaz vremenske ovisnosti okretnog momenta i brzine vrtnje motora za WHTC-ciklus

Mjera za smanjenje emisije dušičnih oksida samo sa selektivnom katalitičkom redukcijom, u cilju udovoljavanja normi Euro 6, podrazumijeva stupanj pretvorbe od najmanje 95 %. Postizanje tako visokog stupnja pretvorbe otežano je zbog hladnog starta i niskotemperaturnih uvjeta pri provođenju ciklusa, kada je zbog nedovoljno visoke temperature nizak stupanj pretvorbe katalizatora. Tako se u prosjeku za cijeli ciklus smanjuje stupanj pretvorbe. Problem se može donekle riješiti dijeljenjem katalizatora za selektivnu katalitičku redukciju u dva dijela, s tim da jedan dio katalizatora manjeg volumena bude postavljen neposredno blizu motora, a glavni dio katalizatora nešto dalje od motora (slika 2). Na taj način se omogućuje brže zagrijavanje manjeg katalizatora u blizini motora i njegovo brzo postizanje visokog stupnja pretvorbe. Nakon zagrijavanja glavnog dijela katalizatora, on preuzima najveći dio pretvorbe, čime se postiže visoki ukupni stupanj pretvorbe.

Redukcijsko sredstvo (vodena otopina uree) ubrizgava se pomoću zračnog puhalu u potrebnoj količini samo ispred manjeg katalizatora postavljenog u blizini Diesela motora. Amonijak koji izlazi iz njega služi dalje kao redukcijsko sredstvo u glavnom katalizatoru.



**Slika 2.** Shematski prikaz sustava za obradu ispušnih plinova za postizanje vrijednosti prema Euro 6 normi

Za smanjenje količine čestica postavlja se odgovarajući pročistač čestica, ispred kojega se nalazi oksidacijski katalizator. Pročistač se regenerira ubrizgavanjem dizelskoga goriva koje oksidira u oksidacijskom katalizatoru. Ako se ne koristi vraćanje ispušnih plinova u motor kao mjera za smanjenje emisije  $\text{NO}_x$ , onda je osjetno niža emisija čestica pa se regeneracija pročistača može lakše obavljati. Također se može izradivati pročistač s manje plemenitih metala. Uz pravilan odabir veličine pojedinih katalizatora, za potpuni učinak cijelog sustava važno je optimirati količinu

redukcijskog sredstva koja se ubrizgava ispred manjeg katalizatora, jer ta količina izravno utječe na efikasnost obaju katalizatora.

Na primjeru jednog Dieselovog motora od 6,7 l radnog volumena i 165 kW snage koji u standardnoj izvedbi udovoljava Euro 4 normi, primijenjen je opisan sustav naknadne obrade ispušnih plinova [1]. Prije toga je emisija NO<sub>x</sub> na izlazu iz motora pri provođenju ETC-ciklusa iznosila 10,9 g/kWh.

Ispušni sustav tog motora je optimiran s ciljem udovoljavanja dopuštenoj emisiji NO<sub>x</sub> prema Euro 6 normi. Odmah do motora postavljen je manji katalizator selektivne katalitičke redukcije volumena 5 l, a nešto dalje glavni katalizator selektivne katalitičke redukcije volumena 17,1 l s aktivnim materijalom od vanadija. Pokazalo se, da je za udovoljavanje postavljenom cilju emisije NO<sub>x</sub> od 0,40 g/kWh prema Euro 6 normi, važno pravilno doziranje redukcijskog sredstva te da je relativno velika potrošnja toga sredstva (oko 8 % potrošnje goriva). Potrošnja goriva se neznatno povećava (oko 0,1 %), a posljedica je povećanog protutlaka u ispušnom sustavu, koji u prikazanoj konfiguraciji ima više dijelova, čime se povećava otpor strujanja ispušnih plinova. Provođenjem WHTC-ciklusa, na izlazu iz motora dobiva se emisija NO<sub>x</sub> od 11,6 g/kWh, iza manjeg katalizatora emisija 3,8 g/kWh, a na izlazu iz ispušnog sustava 1,2 g/kWh.

Da bi se na izlazu iz ispušnog sustava postigla vrlo niska vrijednost emisije NO<sub>x</sub> od 0,40 g/kWh propisana Euro 6 normom, nužno je optimirati sam Dieselov motor, kako bi na njegovom izlazu tzv. sirova emisija NO<sub>x</sub> iznosila oko 7 g/kWh. To se na samom motoru može postići upravljanjem uređajem za ubrizgavanje goriva na način da ono počinje nešto kasnije. Time se smanjuju vršne temperature u cilindru motora, a posljedica je manja emisija NO<sub>x</sub>.

Provođenjem WHTC-ciklusa s hladnim startom na opisanom motoru i ispušnom sustavu uz optimirano ubrizgavanje goriva i doziranje redukcijskog sredstva, dobiveni su rezultati emisije NO<sub>x</sub> koji udovoljavaju vrlo zahtjevnoj Euro 6 normi, a prikazani su u tablici 1 [1].

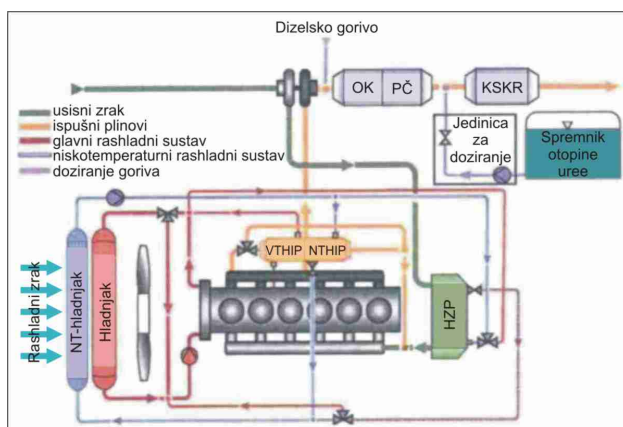
**Tablica 1.** Rezultati WHTC-ciklusa na optimiranom motoru s prikazanim sustavom za naknadnu obradu ispušnih plinova

	Dio WHTC-ciklusa	
	Hladni start	Zagrijani sustav
Emisija NO <sub>x</sub> na izlazu iz motora [g/kWh]	7,4	7,4
Redukcija na manjem katalizatoru [%]	67	70
Redukcija na glavnom katalizatoru [%]	68	84
Emisija NO <sub>x</sub> na izlazu iz ispušnog sustava [g/kWh]	0,78	0,36
Udio u ciklusu	0,1	0,9
Emisija udjela u ciklusu [g/kWh]	0,08	0,32
Emisija za cijeli ciklus [g/kWh]	0,08 + 0,32 = 0,40	

### Vraćanje ispušnih plinova uz primjenu katalizatora i pročistača čestica

Vraćanjem ispušnih plinova smanjuje se maksimalna temperatura tijekom izgaranja, čime se pogoršavaju uvjeti za nastajanje dušičnih oksida pa se tako smanjuje njihova emisija na izlazu iz motora, tzv. sirova emisija. Niža sirova emisija  $\text{NO}_x$  postavlja manje zahtjeve na sustav za naknadnu obradu ispušnih plinova, odnosno na katalizator za selektivnu katalitičku redukciju, zajedno s redukcijskim sredstvom. Procjenjuje se da bi sirova emisija  $\text{NO}_x$  trebala biti oko 2,5 g/kWh, kako bi se postigla vrijednosti emisije  $\text{NO}_x$  prema Euro 6 normi po izlasku iz sustava za naknadnu obradu ispušnih plinova [1]. Za tako nisku sirovu emisiju mora se u cilindre motora vraćati oko 15 % ispušnih plinova pri punom opterećenju do 30 % na praznom hodu.

Vraćanje ispušnih plinova zahtijeva povećani tlak prednabijanja da bi se osigurao potrebn omjer goriva i zraka, ali se time povećava temperatura tijekom izgaranja, koja opet može dovesti do povećanja emisije  $\text{NO}_x$ . Stoga je potrebno pojačano hlađenje ispušnih plinova koji se vraćaju u cilindar te stlačenog zraka po izlasku iz kompresora, a prije ulaska u cilindar. Moguće rješenje takvog sustava prikazano je na slici 3 [2].



**Slika 3.** Rashladni sustav motora s prednabijanjem, vraćanjem ispušnih plinova i selektivnom katalitičkom redukcijom

Zbog vraćanja ispušnih plinova i prednabijanja te potrebe snižavanja vršne temperature za smanjenje emisije  $\text{NO}_x$  prema Euro 6 normi, motoru se mora iz sustava odvesti oko 20 % više topline u odnosu na rješenje za Euro 5 normu.

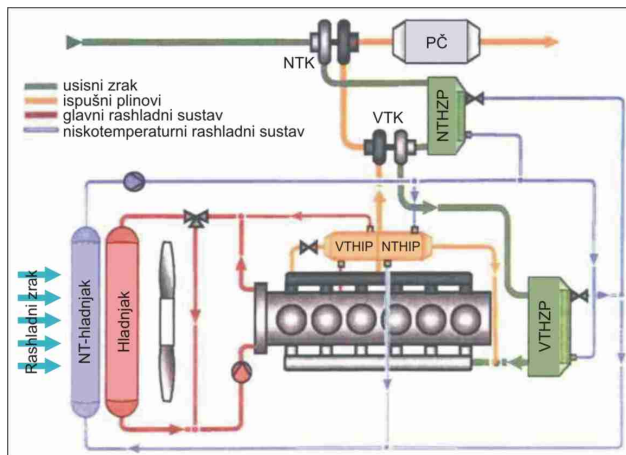
Na slici 3. vide se dva kruga hlađenja: niskotemperaturni krug koji ide preko odgovarajućeg niskotemperaturnog hladnjaka (NT-hladnjak) te glavni krug hlađenja motora koji ide preko glavnog hladnjaka (Hladnjak). Stlačeni zrak na usisu (Usisni zrak), a po izlasku iz kompresora, hladi se u odgovarajućem hladnjaku (H2P-hladnjak zraka nakon prednabijanja) prije ulaska u cilindre motora.

Ispušni plinovi, koji se vraćaju u cilindre, kontrolirano se hlade u visokotemperaturnom hladnjaku (VTHIP-visokotemperaturni hladnjak ispušnih plinova), odnosno u niskotemperaturnom hladnjaku (NTHIP-niskotemperaturni hladnjak ispušnih plinova). Hlađenjem stlačenog zraka za prednabijanje i dvostupanjevitim hlađenjem ispušnih plinova koji se vraćaju u cilindar motora, osigurava se bolje punjenje cilindra uz niži tlak prednabijanja.

Time se smanjuje potrebna snaga za prednabijanje, što rezultira nižom potrošnjom goriva. Ispušni plinovi se obrađuju na način da se najprije provode kroz oksidacijski katalizator (OK) i pročistač čestica (PČ), a na kraju kroz katalizator za selektivnu katalitičku redukciju (KSKR). Za regeneraciju pročistača čestica ciklički se ubrizgava dizelsko gorivo ispred oksidacijskog katalizatora, koje oksidira u oksidacijskom katalizatoru, te se plinovima visoke temperature spaljuju nakupljene čestice u pročistaču. Za selektivnu katalitičku redukciju u katalizatoru (KSKR) ubrizgava se potrebna količina otopine uree iz odgovarajućeg spremnika (Spremnik otopine uree) pomoću jedinice za doziranje. Zbog relativno niske sirove emisije, smanjuje se opterećenje katalizatora i količina sredstva za redukciju.

### Vraćanje ispušnih plinova uz primjenu pročistača čestica

Treći način smanjenja emisije štetnih sastojaka ispušnih plinova, za udovoljavanje Euro 6 normi, predstavlja vraćanje velike količine ispušnih plinova i primjenu pročistača čestica, bez selektivne katalitičke redukcije. Shematski prikaz moguće izvedbe takvog sustava dan je na slici 4 [2].



**Slika 4.** Rashladni sustav motora s dva stupnja prednabijanja i vraćanjem ispušnih plinova

Udio vraćenih ispušnih plinova treba biti od 35 do 40 % pri punom opterećenju. Da bi se osigurala niska temperatura ispušnih plinova na ulasku u cilindre motora, mora se provoditi njihovo hlađenje u dva stupnja; u visokotemperaturnom hladnjaku ispušnih plinova (VTHIP) i niskotemperaturnom hladnjaku ispušnih plinova (NTHIP). Zbog velike količine vraćenih ispušnih plinova potrebna je i dovoljna količina zraka da bi se u svim režimima osigurala siromašna smjesa i na taj način spriječilo nastajanje čestica. To se može ostvariti visokim stupnjem prednabijanja. Kako se tako visoki stupanj kompresije ne može izvesti u jednom stupnju, nužna su dva stupnja kompresije, odnosno dva kompresora; niskotlačni kompresor (NTK) i visokotlačni kompresor (VTK). Zrak koji se dovodi u motor (usisni zrak) tlači se najprije u niskotlačnom kompresoru, a zatim visokotlačnom kompresoru. Za hlađenje tog zraka koriste se dva hladnjaka; po izlasku iz niskotlačnog kompresora zrak se hladi u niskotlačnom hladnjaku zraka nakon

prednabijanja (NTHZP), a po izlasku iz visokotlačnog kompresora u visokotlačnom hladnjaku zraka nakon prednabijanja (VTHZP). Uz navedene mjere, nužno je provesti i upravljanje ubrizgavanjem goriva u cilindre motora da bi se veći dio goriva ubrizgao prije početka izgaranja u siromašnoj smjesi. Uobičajeno se to postiže ranijim ubrizgavanjem goriva ili dijela goriva uz smanjenje srednjeg efektivnog tlaka, što se pri većoj snazi dodatno pospješuje promjenljivim upravljanjem ventilima.

### EMISIJA CO U SVIJETLU MJERA ZA POSTIZANJE EURO 6 NORME

Emisija CO u Dieselovih motora u osnovi ne predstavlja problem, s obzirom na to da Dieselovi motori rade s vrlo siromašnom smjesom, što omogućuje potpuno izgaranje ugljika, odnosno oksidaciju nastalog ugljičnog monoksida (CO). Uvođenjem oksidacijskih katalizatora u naknadnu obradu ispušnih plinova dodatno se osigurava oksidacija CO. Stoga udovoljavanje propisanoj vrijednosti dopuštene emisije CO prema Euro 6 (1,5 g/kWh - za teška teretna vozila) ne predstavlja problem.

Međutim, uvođenjem mjera za smanjenje emisije NO<sub>x</sub>, kao što je vraćanje veće količine ispušnih plinova, stvaraju se uvjeti za nastajanje CO. Ako se pritom za naknadnu obradu ispušnih plinova ne koristi oksidacijski katalizator, emisija CO može biti problem pri udovoljavanju Euro 6 normi.

CO nastaje zbog lokalne nehomogenosti smjese goriva i zraka u cilindrima motora, koja mjestimično može biti vrlo bogata te u neposrednoj blizini hladnijih dijelova stijenki cilindra. Njegova oksidacija se može ostvariti uz prisustvo dovoljno velike količine kisika i pri dovoljno visokoj temperaturi tijekom izgaranja i ekspanzije. Ne ispuni li se barem jedan od tih uvjeta, izostaje oksidacija, a u sirovoj emisiji pojavljuje se veća količina CO.

Mjere koje mogu dovesti do smanjenja sirove emisije CO mogu se svesti u sljedeće [3]:

- optimiranje količine predubrizganog goriva
- smanjenje kuta predubrzanja

- optimiranje tlaka ubrizgavanja
- povećanje mase zraka.

Za naknadnu oksidaciju CO potrebna je veća temperatura ispušnih plinova, koja se može ostvariti [3]:

- kasnijim ubrizgavanjem glavne količine goriva
- smanjenjem tlaka ubrizgavanja podjelom glavnog
- ubrizgavanja na dva ubrizgavanja (Split Main)
- aktiviranjem prigušne zaklopke vraćanjem ispušnih plinova.

Navedene mjere moraju se optimalizirati na način da se pored smanjenja emisije CO, osigura zadovoljavajuće niska potrošnja goriva, a ne pogorša emisija NO<sub>x</sub> i čestica, koja se spomenutim mjerama mora održati unutar dopuštenih vrijednosti prema Euro 6 normi.

## ZAKLJUČAK

Svaki novi propis o dopuštenoj emisiji štetnih sastojaka ispušnih plinova prijevoznih sredstava donosi sve niže granice, koje predstavljaju veliki napor za proizvođače i istraživače. Euro 6 norma je sljedeća norma čiji se početak uvođenja predviđa za 2014. godinu. Za teška teretna vozila, odnosno za Dieselove motore tih vozila, predviđa se vrlo veliko smanjenje dopuštene emisije NO<sub>x</sub> i čestica.

Analizom mogućnosti smanjenja emisije tih sastojaka, dolazi se do zaključka da je postizanje propisanih vrijednosti izuzetno težak i složen zadatak. Ako se tome doda i zahtjev da se dodatno smanji i potrošnja goriva, čini se to kao nemoguća misija.

Mjere koje se mogu poduzeti usložnjavaju uređaje i opremu te poskupljuju cijelo vozilo te njihovo korištenje i održavanje. S obzirom na tržišne uvjete, proizvođači moraju osigurati prihvatljivu cijenu i pouzdani proizvod. Prema dosadašnjim spoznajama o utjecaju pojedinih čimbenika na emisiju štetnih sastojaka i potrošnju goriva može se poduzeti niz mjera za postizanje propisanih vrijednosti prema Euro 6 normi.

Za smanjenje emisije NO<sub>x</sub> i čestica u osnovi postoje tri mjere; to je selektivna katalitička redukcija uz primjenu redukcijskog sredstva, vraćanje ispušnih plinova s visokim prednabijanjem i intenzivnim hlađenjem te primjena pročistača čestica.

Prva mjera podrazumijeva primjenu selektivne katalitičke redukcije i pročistača čestica, bez vraćanja ispušnih plinova. Optimalizacijom cijelog sustava moguće je postići postavljeni cilj smanjenja emisije štetnih sastojaka do vrijednosti propisanih Euro 6 normom. Izostavljanjem vraćanja ispušnih plinova smanjuje se potrošnja goriva i emisija čestica te se smanjuju zahtjevi prema pročistaču čestica. Međutim, povećava se potrošnja redukcijskog sredstva (vodena otopina uree).

S obzirom na to da se za mjerenje emisije prema Euro 6 normi planira provođenje WHTC-ciklusa, koji u sebi sadrži i hladni start, nužno je jedan manji katalizator za selektivnu katalitičku redukciju postaviti neposredno u blizinu motora da bi se osiguralo njegovo brzo zagrijavanje i smanjio utjecaj hladnog starta na ukupnu emisiju štetnih sastojaka.

Druga mjera predviđa vraćanje ispušnih plinova, što dovodi do smanjenja maksimalne temperature tijekom izgaranja. Time se pogoršavaju uvjeti za nastajanje dušičnih oksida pa se tako smanjuje njihova sirova emisija. Tako se umanjuju zahtjevi na sustav za naknadnu obradu ispušnih plinova, odnosno na katalizator za selektivnu katalitičku redukciju te potrebnu količinu redukcijskog sredstva. No, vraćeni ispušni plinovi se moraju hladiti posebnim međuhladnjakom, često u dva stupnja (područje visoke i niske temperature). Motoru se mora dodati i uređaj za prednabijanje kojim se osigurava potrebna količina svježeg zraka te međuhladnjak za hlađenje tog zraka.

Zbog stvorenih uvjeta koji više pogoduju nastajanju čestica, mora se ugraditi oksidacijski katalizator s pročištačem čestica te uređajem za njegovu regeneraciju. Treći način podrazumijeva vraćanje velike količine ispušnih plinova i primjenu pročištača čestica, bez selektivne katalitičke redukcije. Ispušni plinovi se moraju hladiti u dvostupnjevatom hladnjaku prije ulaska u cilindre motora.

Primjenom te mjere mora se osigurati velika količina svježeg zraka, a to se obično postiže dvostupnjevitim prednabijanjem te hlađenjem tog zraka iza svakog kompresora. Posljedica povećanog vraćanja ispušnih plinova je veća emisija čestica, zbog čega je potreban veći pročištač. Uz navedene mjere, nužno je provesti i upravljanje ubrizgavanjem goriva u cilindre motora te promjenljivo upravljanje ventilima.

Vraćanjem veće količine ispušnih plinova za smanjenje emisije  $\text{NO}_x$  stvaraju se uvjeti za nastajanje CO. Da bi emisija CO ostala u dopuštenim granicama nužno je provesti mjere za smanjenje sirove emisije CO te mjere za naknadnu oksidaciju CO.