

Dr. JOSIP ZAVADA
Fakultet prometnih znanosti
Zagreb, Vukelićeva 4

Promet i čovjekova okolina

Pregledni članak

UDK: 621.43.019.9 : 621.434 : 504.06

Primljeno: 22.10.1992.

Prihvaćeno: 08.03.1993.

Jedinica	Kamije (bez testiranja)	Prijelaz od 1.98.	3.18	CO
g/km	1.82	2.2	3.18	CO
g/km	0.14	0.42	1.13	HC+NOx

MJERE ZA SMANJENJE EMISIJE ŠTETNIH KOMPONENATA ISPUŠNIH PLINOVA OTTOVA MOTORA

SAŽETAK

U ovom radu obrađuju se mjere koje se mogu poduzeti u motoru i izvan motora da bi se smanjila emisija štetnih komponenata u ispušnim plinovima. Navedene mjere iznalaze se sa svrhom da se udovolji sve strožim zakonskim propisima o granicama dopuštenih emisija štetnih komponenata. Pokazuje se u kojoj mjeri se pojedinim mjerama može utjecati na razinu emisije pojedinih komponenata, te se ukazuje na značenje pojedinih mjera. Ističe se i nužnost optimiranja svih poduzetih mjera na motoru da bi se emisija štetnih komponenata svela na najmanju mjeru.

1. UVOD

Motorna vozila u velikoj mjeri onečišćuju okoliš ispušnim plinovima. Da bi se to onečišćenje smanjilo ili barem ublažilo, zakonodavstvo donosi propise kojima se ograničuje emisija štetnih komponenata ispušnih plinova. S obzirom na to da se broj vozila s vremenom sve više povećava, što bi značilo i sve veće onečišćavanje okoliša, granice dopuštenih emisija pojedinih štetnih komponenata, koje se zakonom propisuju, sve su strože. Da bi opstali na tržištu i osvajali nova, proizvođači moraju udovoljiti postojećim zakonskim propisima. Štoviše, oni moraju brinuti o budućim propisima kako bi ih spremni dočekali. Za postizanje takvih rezultata nužna su sustavna istraživanja i velika ulaganja u razvoj. Razvojni odjeli proizvođača i svi znanstvenici uključeni u ovu problematiku istražuju načine da se udovolji sadašnjim i budućim zakonskim propisima. Ovdje će stoga biti riječ o mjerama koje se poduzimaju ili bi se mogle poduzeti u tu svrhu. Pritom će se promatrati samo Ottov motor.

2. SADAŠNJI I BUDUĆI PROPISI

Zakonska ograničenja što se odnose na dopuštenu emisiju štetnih komponenata propisuju se u pojedinim zemljama ili zajednicama, a najčešće se ograničuje razina emisije CO, HC i NO_x, odnosno njihova količina pri propisanom postupku ispitivanja. Prva ograničenja pojavila su se u SAD, da bi nakon toga slične mjere poduzimale i druge zemlje, već prema stupnju razvoja i brige za čovjekov okoliš. Postupci ispitivanja propisuju, uz ostalo, i ciklus vožnje

kojemu se vozilo mora podvrgnuti da bi mu se izmjerila količina nastalih štetnih komponenata.

U SAD se primjenjuje ciklus pod nazivom FTP75 (Federal Test Procedure), koji je dobio konačni oblik 1975. godine u Los Angelesu. Ciklus je stohastičkoga karaktera i počinje s hladnim motorom. U Japanu se primjenjuje test s dva ciklusa; jedan je s deset stupnjeva koji počinje sa zagrijanim motorom i jedan s jedanaest stupnjeva koji počinje s hladnim motorom. U Europi vrijedi poseban ciklus po kojemu se provodi Europa-test, a vožnja počinje s hladnim motorom. No, jedan dio razvijenih europskih zemalja primjenjuje FTP75 smatrajući ga zahtjevnijim i mjerodavnijim za odražavanje prometa u urbanim sredinama. Za Europsku zajednicu predviđen je novi ciklus vožnje, tzv. EZ-vozni ciklus. Sada važeće granične vrijednosti u nekim zemljama pokazane su u tablici 1.[1].

Tablica 1. Sadašnje granične vrijednosti količina nastalih štetnih komponenata za vozila s Ottovim motorima u nekim državama

Država	Ciklus	CO	HC	NO _x	HC+NO _x	Jedinica
SAD - 49 država	FTP75	3,4	0,41	1,0	-	g/milja
SAD - Kalifornija	FTP75	7,0	0,41	0,4	-	g/milja
Njemačka	FTP75	2,1	0,25	0,62	-	g/km
Njemačka	EZ - ciklus	38,25	-	6,0	12,75	g/test
Japan	10 stupnjeva	2,7	0,39	0,48	-	g/km
Japan	11 stupnjeva	85,0	9,5	6,0	-	g/test

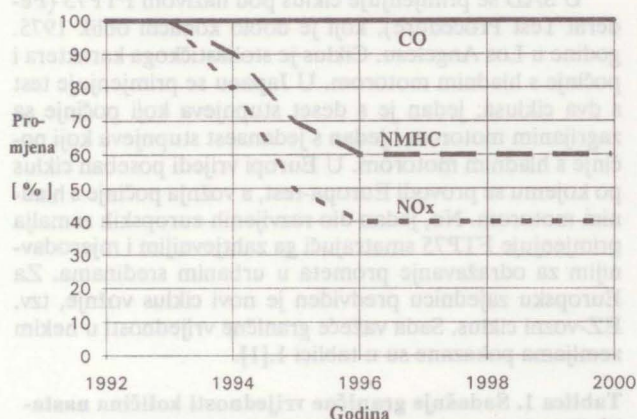
Usporede li se te vrijednosti nastalih štetnih komponenata s vrijednostima koje su postajale u vrijeme uvođenja prvih ograničenja, smanjenja iznose oko 90%. Treba pritom imati na umu da su u to doba uređaji na motorima bili jednostavne konstrukcije. Tako se u uređaju za napajanje gorivom primjenjivao klasični karburator, a uređaj za električno paljenje bio je klasični kontakti.

Iako je navedeno smanjenje emisije štetnih komponenata u ispušnim plinovima bilo zaista veliko u razdoblju zakonskog ograničavanja, zakonodavstvo pojedinih država i zajednica predviđaju i daljnja smanjenja sadašnjih graničnih vrijednosti. Tako se u EZ predviđaju granične vrijednosti štetnih komponenata kako je predočeno u tablici 2.[1]. Pritom se test provodi po novom EZ- ciklusu.

Tablica 2. Sadašnje i buduće granične vrijednosti dopuštenih količina nastalih štetnih komponenata u EZ prema novom EZ-ciklusu vožnje

Komponenta	Sadašnje granice	Prijedlog od 1.1.96.	Kasnije (bez termina)	Jedinica
CO	3,16	2,2	1,62	g/km
HC+NO _x	1,13	0,45	0,14	g/km

Slična situacija je i u SAD gdje su zahtjevi glede budućih dopuštenih emisija štetnih komponenata i njihovih održavanja tijekom eksploatacije još stroži. Strože granice odnose se prvenstveno na HC i NO_x. Slika 1. pokazuje relativne promjene dopuštenih količina pojedinih komponenata u budućnosti, u odnosu na današnje granične vrijednosti [1]. Za neizgorjele ugljikovodike ne uzima se metan, već samo ostali ugljikovodici (NMHC = non methane hydrocarbon). Proizvođač mora jamčiti da će se tijekom eksploatacije emisija štetnih komponenata zadržati u dopuštenim granicama i nakon prijedehnih 100 000 milja. Kontrola se mora osigurati na vozilu (OBD = On board diagnose).



Slika 1. Predviđene promjene dopuštenih emisija u SAD

3. MOGUĆE MJERE ZA ZADOVOLJAVANJE POSTAVLJENIH ZAHTJEVA

Dosadašnji razvoj motora s unutarnjim izgaranjem bio je u smjeru njegovog usavršavanja u svakom pogledu. Već prema namjeni, davala bi se prednost nekom od elemenata značajki motora. Tako se najčešće radilo na povećanju jedinične snage motora. Kasnije se zbog zakonskih propisa i energetske krize značenje davalo smanjenju potrošnje goriva. Danas je jedna od najvažnijih značajki komercijalnih motornih vozila da ima nisku emisiju štetnih komponenata u ispušnim plinovima. Pritom se nastoje postići što bolje i ostale značajke.

S obzirom na to da se već više od dvadeset godina zakonski ograničuje emisija štetnih komponenata u ispušnim plinovima, spoznaje o mogućnostima njenog smanjenja su važne, kako među znanstvenicima u toj oblasti tako i među proizvođačima. Općenito se najvažnije mjere za smanjenje emisije štetnih komponenata u ispušnim plinovima Ottova motora mogu podijeliti na mjere koje se poduzimaju unutar motora i mjere koje se poduzimaju izvan motora.

Mjere vezane za motor odnose se prvenstveno na upravljanje procesom izgaranja da bi se spriječilo nastaja-

nje štetnih komponenata u plinovima izgaranja, odnosno da njihova količina bude što manja. One se mogu podijeliti glede na:

- pripremu smjese goriva i zraka,
- kretanje smjese goriva i zraka u cilindru motora,
- oblikovanje prostora izgaranja,
- temperaturu stijenki prostora izgaranja,
- stupanj kompresije i
- djelomično vraćanje ispušnog plina u cilindar motora.

Mjere što se poduzimaju izvan motora pretežito razumijevaju naknadnu obradu već nastalih ispušnih plinova, a čine ih:

- primjena katalizatora,
- zagrijavanje katalizatora,
- toplinska izolacija ispušnog sustava,
- upuhivanje sekundarnog zraka i
- upravljanje motorom.

3.1. Mjere unutar motora

U prethodnom poglavlju prvospomenuta mjera jest priprema smjese goriva i zraka. Ta mjera ima važan utjecaj na razinu emisije CO, a napose na razinu emisije neizgorjelih ugljikovodika (HC). Idealna je homogena smjesa, što znači smjesa s potpuno isparenim gorivom ravnomjerno izmiješanim sa zrakom. Lošijom pripremom smjese pojavljuju se kapljice goriva u prostoru izgaranja što znatno povećava emisiju HC i CO. Ta je pojava osobito izražena dok je motor još hladan, kada gorivo slabije isparava. Pritom se kapljice goriva unose u cilindar, a jedan dio goriva se sliježe po stijenkama usisnih kanala. Pogoršanje konačnih rezultata u ispuhu pridonosi i to što katalizator još ne radi dok ne dosegne radnu temperaturu.

Stvaranju homogene smjese pridonosi ubrizgavanje goriva u struju zraka koji se usisava u cilindar. Da bi gorivo potpuno isparilo, osobito u razdoblju dok je motor još hladan, trebalo bi elemente brizgaljke grijati. Na taj način postiže se smanjenje emisije HC od 15 do 40% [2]. No, za takvo rješenje problem je osiguranje dostatne količine električne energije.

Kretanje radnog medija u cilindru i prostoru izgaranja ima utjecaja na njegovo homogeniziranje. Povećano kretanje daje u tom smislu bolje rezultate. Današnji trend gradnje četveroventilskih motora, da bi se povećala jedinična snaga, donosi približno jednaku razinu emisije CO i NO_x, ali nešto povećanu emisiju HC, oko 20% [3]. Razlozi tomu su u smanjenom kretanju radnog medija u prostoru izgaranja, osobito pri nižim opterećenjima, prisutnijem gašenju plamena zbog većeg stupnja kompresije, kraćem putu izgaranja, bržem izgaranju i nižim temperaturama ispuha što smanjuje naknadne reakcije. Niža temperatura ispušnih plinova pogoršava i rad katalizatora. Pri nižim opterećenjima ti motori imaju lošiju mehaničku korisnost što zahtijeva veći protok radnog medija, a to znači veću količinu nastalih štetnih komponenata. Stoga se u tih motora posebna pažnja mora posvetiti mjerama za smanjenje emisije štetnih komponenata izvan motora, odnosno za naknadnu obradu ispušnih plinova.

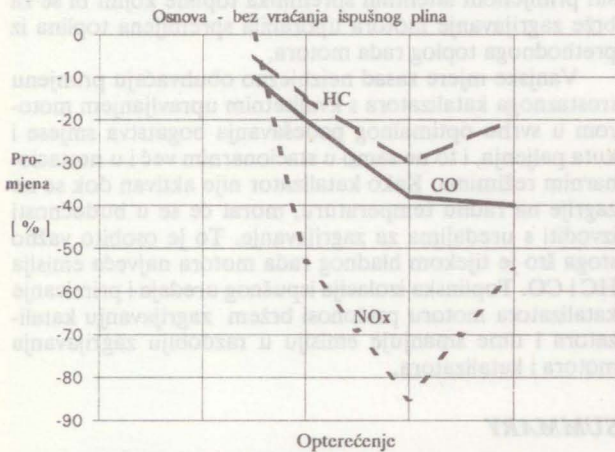
Neizgorjeli ugljikovodici nastaju uglavnom gašenjem plamena. Jedna mogućnost je gašenje plamena na hladnim stijenkama prostora izgaranja. Stoga ta temperatura izravno utječe na količinu nastalih HC. S povećanjem temperature stijenke plamen u većoj mjeri obuhvaća smjesu goriva i zraka u blizini stijenke čime se smanjuje količina HC u ispušnim plinovima. Tako je viša temperatura stijenki pro-

stora za izgaranje prikladna mjera za smanjenje emisije HC u ispušnim plinovima. To smanjenje može iznositi do 20% [1].

Problem hladnih stijenki osobito je istaknut pri pokretanju hladnog motora. To je još važnije što u tom razdoblju, kada je povećana emisija HC i CO, katalizator još nije postao aktivan zbog nedostatno visoke temperature. U tom smislu poželjno je skratiti fazu zagrijavanja motora i katalizatora. Jedna je mogućnost u ugradbi latentnog spremnika topline [4]. Njegova bi zadaća bila da spremi stano vitu količinu topline dok motor radi na toplom režimu i da je vrati, nakon određenoga neradnog razdoblja motora, kada se motor ponovno pokreće. Time bi se vrijeme zagrijavanja motora na radnu temperaturu znatno skratilo. Takav sustav još je u razvoju. Potrebno je usavršiti izolacijski sustav, smanjiti težinu i učiniti ga da cijenom bude prihvatljiv.

Djelomično vraćanje ispušnih plinova u cilindar motora već je dulje poznat način za smanjenje emisije dušičnih oksida. Vraćanjem ispušnih plinova smanjuje se maksimalna temperatura pri izgaranju čime se pogoršavaju uvjeti stvaranja NO_x . No, vraćanje ispušnih plinova, uz prednost što smanjuje NO_x , ima i nedostataka. Tako se pogoršavaju uvjeti oksidacije nepotpuno oksidiranih komponenata i mogućnosti gašenja plamena. U takvim uvjetima povećava se emisija CO i HC. Moguća su dva načina vraćanja ispušnih plinova - unutarnji i vanjski. Unutarnji način vraćanja ispušnih plinova razumijeva upravljanje razvodnim mehanizmom ovisno o režimu rada. Motor mora biti izveden s posebnim bregastim vratilima za ispušne i usisne ventile. Upravljanje bregastim vratilima omogućuje prilagodavanje trenutka otvaranja, odnosno zatvaranja pojedinih ventila. Na taj način može se upravljati količinom vraćenih ispušnih plinova u cilindar motora [5].

Dobro optimiranje unutarnjeg vraćanja ispušnih plinova, optimiranjem ostalih veličina, cjelovitu sliku emisije ipak poboljšava (sl.2.). Vraćanjem ispušnih plinova povećava se prosječna temperatura u fazi kompresije što utječe na smanjenje potrošnje goriva i mirnoću rada.



Slika 2. Relativna promjena emisije štetnih komponenata u ovisnosti o opterećenju motora za optimirani rad razvodnog mehanizma

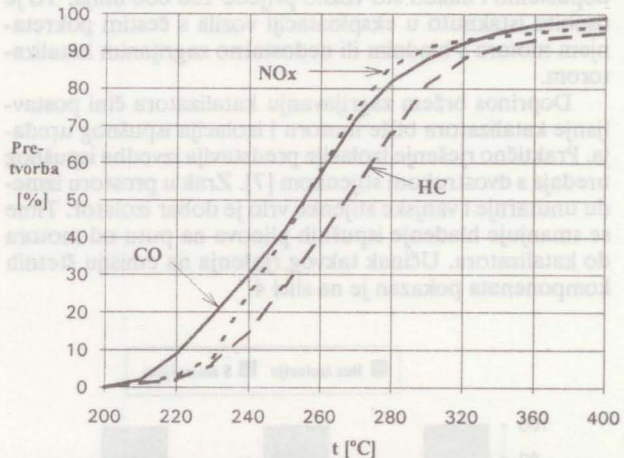
Vanjsko vraćanje ispušnog plina razumijeva njegovo vraćanje iz ispušne cijevi u usisnu cijev. Time se povećava prosječna temperatura smjese i intenzivira izgaranje. To također rezultira smanjenjem emisije svih komponenata, napose NO_x . Pritom se podrazumijeva nužnost optimiranja

bogatstva smjese i kuta paljenja u svim režimima rada motora.

Sve navedene mjere unutar motora ipak nisu dostatne da zadovolje buduće strože granice dopuštenih emisija štetnih komponenata. Stoga je neophodno na ovom stupnju razvoja tehnike primjenjivati i vanjske mjere za smanjenje emisija štetnih komponenata.

4. MJERE IZVAN MOTORA

Jedini način da se emisija štetnih komponenata održi ispod sadašnjih i budućih propisanih graničnih vrijednosti u današnjem stupnju tehničkog razvoja jest primjena trostaznoga katalizatora. Novoproduzeti automobili opremljeni Ottovim motorom redovito se opremaju tim katalizatorom. Za njegov učinkovit rad nužno je da se smjesa goriva i zraka drži stehiometrijskom. To se postiže primjenom lambda sonde i odgovarajuće elektronske pretvorbe štetnih komponenata doseže više od 90%, kako je to vidljivo na slici 3. [6]. Sa slike je također vidljivo da se katalizator za takvu učinkovitost mora zagrijati barem do 300°C.



Slika 3. Učinkovitost pretvorbe trostaznoga katalizatora u ovisnosti o temperaturi

Potrebna da se katalizator zagrije na spomenutu radnu temperaturu predstavlja najveći problem pri pokretanju hladnog motora. Da bi se katalizator zagrijao do oko 250°C, kada je učinkovitost pretvorbe oko 50%, potrebno je oko 150 sekundi. U tom vremenu neaktivnoga katalizatora i hladnog motora koncentracije HC i CO komponenata su najveće.

Problem je, dakle, kako pri pokretanju hladnog motora što prije zagrijati katalizator na radnu temperaturu. Postoji nekoliko mogućnosti koje će se ukratko predočiti.

Da bi motor mirno radio dok je još hladan, smjesa goriva i zraka mora biti bogata, što povećava količinu HC i CO u ispušnim plinovima. To se može iskoristiti tako da naknadnim upuhivanjem sekundarnog zraka u ispušne plinove, ispred katalizatora, oksidiraju neizgorjele komponente, a pritom oslobođena toplina služi za brže zagrijavanje katalizatora. Podešavanjem kasnijeg paljenja temperatura ispušnih plinova se povećava, što pospješuje sekundarnu oksidaciju i ubrzava zagrijavanje katalizatora. Pri tom rješenju potrebno je optimirati koeficijent viška zraka, kut paljenja, količinu sekundarnog zraka i mjesto njegovog upuhivanja.

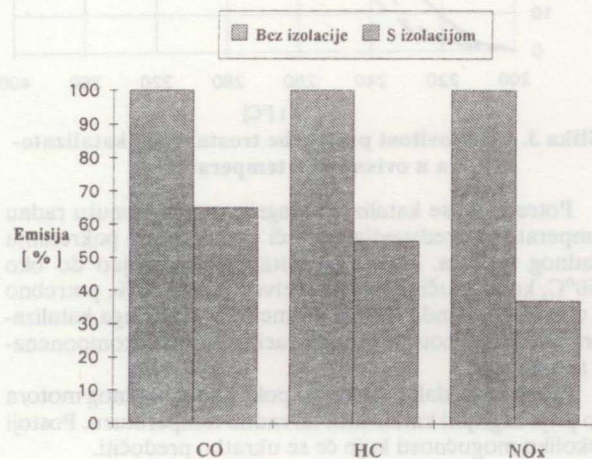
Smjesa goriva i zraka može se tijekom hladnog rada učiniti vrlo bogatom tako da motor radi kao "generator". Ispušni plinovi se zatim zapale u posebnoj komori za izgaranje ispred katalizatora što omogućuje brzo zagrijavanje katalizatora. To rješenje je u eksperimentalnoj fazi, a pitanje je bi li takav sustav bio u stanju raditi ispravno i nakon 100 000 milja kako to određuju novi propisi SAD.

Zagrijavanje katalizatora moglo bi se ubrzati i ugradbom posebnoga gorionika ispred katalizatora neovisno o motoru, a može se uključiti i prije samog pokretanja motora. To rješenje međutim usložnjava opremu i zahtijeva određeni prostor ispod poda automobila, što je često problematično.

Predgrijavanje katalizatora prije pokretanja hladnog motora moguće je i električnim grijačem ugrađenim u katalizator. Zagrijavanje bi se moglo ostvariti za nekoliko sekundi, ali je za to potreban dostatan kapacitet baterija. To bi moglo biti prihvatljivo u manjih vozila no u većih vozila, koja imaju veće katalizatore, kapacitet baterija postaje nedostatan.

Za većinu mogućih rješenja bržeg zagrijavanja katalizatora važan je problem dugotrajnosti, koja u ovom slučaju znači zadržavanje emisije štetnih komponenata u sklopu dopuštenih i nakon što vozilo prijeđe 100 000 milja. To je osobito istaknuto u eksploataciji vozila s čestim pokretanjem motora s hladnim ili nedostatno zagrijanim katalizatorom.

Doprinos bržem zagrijavanju katalizatora čini postavljanje katalizatora bliže motoru i izolacija ispušnog uređaja. Praktično rješenje izolacije predstavlja izvedba ispušnog uređaja s dvostrukom stijenkom [7]. Zrak u prostoru između unutarnje i vanjske stijenke vrlo je dobar izolator. Time se smanjuje hlađenje ispušnih plinova na putu od motora do katalizatora. Učinak takvog rješenja na emisiju štetnih komponenata pokazan je na slici 4.



Slika 4. Utjecaj izoliranosti ispušnog uređaja na relativnu promjenu emisije štetnih komponenata tijekom zagrijavanja

Među navedenim vanjskim mjerama za smanjenje emisija štetnih komponenata spomenuto je na početku i upravljanje motorom. Suvremena rješenja upravljanja motorom primjenom elektronike omogućuju optimiranje količine ubrizganoga goriva i kuta paljenja u svakom stacionarnom režimu. Takve rezultate je teško postići u nestacionarnim režimima. Svako odstupanje od optimalnih vrijednosti povećava emisiju štetnih komponenata. To se posebice odno-

si na bogatstvo smjese goriva i zraka. Trostazni katalizator ima spomenutu djelotvornost pretvorbe samo ako je smjesa stehiometrijska, odnosno ako je koeficijent viška zraka $\lambda = 0,99 \div 1,00$. Svako odstupanje u jednom ili drugom smjeru povećava emisiju neke od štetnih komponenata ovisno o smjeru odstupanja. Za poboljšanje upravljanja motorom u nestacionarnim režimima nužna su daljnja usavršavanja u smislu obuhvaćanja i obrade više informacija o režimu rada motora. Pritom se misli i na davače postavljene u komoru izgaranja da bi se dobile informacije za termodinamičku obradu procesa u cilindru motora.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu se uočava da postoji veliki broj mjera za smanjenje emisije štetnih komponenata u ispušnim plinovima vozila s Ottovim motorima. Da bi se postigli najbolji rezultati, te da se udovolji sadašnjim strogim propisima i još strožim budućim propisima o dopuštenoj emisiji štetnih komponenata, nužno je da primjena tih mjera kao cjelina bude optimalna. To je problem koji znanstvenici i proizvođači moraju i dalje intenzivno rješavati.

Mjerama unutar motora nastoji se ostvariti homogena smjesa goriva i zraka. Tomu pridonosi potpuno isparavanje goriva i intenzivno vrtloženje smjese, čemu treba pridonijeti prikladno oblikovani usisni kanal i prostor izgaranja. Kvalitetno ubrizgavanje i raspršivanje goriva treba smanjiti udio kapljica goriva u smjesi, kao i stvaranje filma na stijenkama usisnoga kanala i cilindra. Unutarnje vraćanje ispušnih plinova varijabilnim pogonom razvodnog mehanizma, odnosno ventilima, kao i odmjereno vanjsko vraćanje ispušnih plinova u cilindar motora - pospješuju smanjenje emisije štetnih komponenata u cijelom vijeku vozila.

Da bi se gašenje plamena na hladnim stijenkama svelo na najmanju mjeru, potrebno je temperaturu stijenke držati što višom. Nedostatna temperatura stijenke osobito je izražena pri pokretanju hladnog motora, što se nastoji riješiti primjenom latentnih spremnika topline kojim bi se za brže zagrijavanje motora uporabila spremljena toplina iz prethodnoga toplog rada motora.

Vanjske mjere zasad neizbježno obuhvaćaju primjenu trostaznoga katalizatora s kvalitetnim upravljanjem motorom u svrhu optimalnog podešavanja bogatstva smjese i kuta paljenja, i to ne samo u stacionarnim već i u nestacionarnim režimima. Kako katalizator nije aktivan dok se ne zagrije na radnu temperaturu, morat će se u budućnosti izvoditi s uređajima za zagrijavanje. To je osobito važno stoga što je tijekom hladnog rada motora najveća emisija HC i CO. Toplinska izolacija ispušnog uređaja i primicanje katalizatora motoru pridonosi bržem zagrijavanju katalizatora i time smanjuje emisiju u razdoblju zagrijavanja motora i katalizatora.

SUMMARY

MEASURE ON REDUCTION OF HARMFUL OTTO ENGINE EXHAUST EMISSIONS

This paper deals with the measures that may be taken in the engine and outside the engine in an effort to reduce the harmful motor exhaust gas concentration emissions. These measures are being taken and elaborated with the prospect of meeting the increasingly requiring legal provisions on allowed concentrations of harmful exhaust emissions.

This is meant to show the extent to which individual measures influence the level of emission of individual components, discussing at the same time the character of individual measures. The paper further reiterates the indispensability of optimization of all measures taken in the engine to reduce the emission of harmful exhaust gases to the minimum.

LITERATURA

- [1] K. HOCKEN, P. LANGEN, J. MALLOG: Abgas - Emission-sreduzierung - eine Herausforderung für die Automobilindustrie. MTZ 53 (1992) 7/8, str. 326-338.
- [2] J. MALLOG, M. KLÜTING: Einsatz moderner Messverfahren zur Analyse und Optimierung der ottomotorischen Verbrennung. MTZ 50 (1989) 6, str. 275-279.
- [3] M. THEISSEN: Das Konzept der neuen BMW Vierventil-Motoren. MTZ 51 (1990) 1, str. 18-22.
- [4] P. BLÜHER: Latentwärmespeicher erhöht den Fahrkomfort und die Fahrsicherheit. ATZ 93 (1991) 10, str. 620-625.
- [5] Q.H.VO, K. OEHLING: Untersuchungen an hydraulischen variablen Ventilsteuerungen. MTZ 52 (1991) 12, str. 622-630.
- [6] J. ZAVADA, S. PERŠE: Smanjenje emisije štetnih komponenata ispušnih plinova oto-motora primjenom katalizatora. Simpozij SEPJ, Zagreb, 1988, str. 171-174.
- [7] T. NORDING: Neuartiges Konzept für isolierte Abgaskrümmmer, Vorrohre und Katalysatoren. MTZ 52 (1991) 4, str. 206-210.