

Dr. JOSIP ZAVADA
Dr. IVAN MAVRIN
Fakultet prometnih znanosti
Zagreb, Vukelićeva 4

Promet i čovjekova okolina
Izvorni znanstveni rad
UDK: 621.431
Primljeno: 10.12.1990.
Prihvaćeno: 25.12.1990.

EMISIJA ŠTETNIH KOMPONENATA ISPUŠNIH PLINOVA OTO-MOTORA U KARAKTERISTIČNIM REŽIMIMA RADA

SAŽETAK

U ovom radu opisuje se način na koji se može provesti proračun emisije štetnih komponenata u ispušnim plinovima oto-motora u raznim režimima rada. Tako su posebno obrađeni: prazan hod, stacionarno opterećenje, ubrzanje i usporenje. Ukazuje se na utjecaj ulaznih veličina u proračunu na izlazne veličine. Pritom se određuje koncentracija i ukupna količina toksičnih komponenata u određenom razdoblju.

Proračun se temelji na kompletnom proračunu jednog ciklusa u cilindru motora, a opterećenja se odabiru iz režima Europa-testa. Rezultati proračuna verificirani su eksperimentom.

1. UVOD

Sve strožiji zahtjevi da se smanji emisija štetnih komponenata u ispušnim plinovima oto-motora, prvenstveno iz ekoloških razloga, prisiljava na istraživanje mogućih načina da se tim zahtjevima udovolji. Dakako, najvažnije je spoznati uzročnike nastajanja štetnih sastojaka u plinovima izgaranja, što omogućuje traženje rješenja tog problema.

Jedan od pristupa u rješavanju čini modeliranje radnog ciklusa u motoru, da bi se izračunali udjeli pojedinih komponenata u ispušnim plinovima. Primjenom računala, modeliranje predstavlja efikasno sredstvo pri optimalizaciji radnog ciklusa po postavljenim kriterijima.

Sastav plinova najčešće se definira u volumenskim ili masenim udjelima. Cilj je smanjiti udjele ugljičnog monoksida, neizgorjelih ugljikovodika i dušičnih oksida, komponenata štetnih za ljudsko zdravlje. Međutim, važna je i količinski ukupna emisija tih komponenata u određenom vremenu rada motora na definiranim režimima.

Da bi se ujednačili kriteriji ispitivanja motornih vozila u svezi s emisijom štetnih komponenata, u svijetu su uvedeni tzv. testovi. U Europi je na snazi tzv. Europa-test. On definira dopuštene granice ukupne masene emisije pojedinih štetnih komponenata. Radi zadovoljenja tih granica bitno je poznavati i emisije štetnih komponenata na pojedinim režimima rada, koji se testom definiraju, da bi se moglo ukazati na mjesta mogućih i učinkovitih intervencija.

Proračun emisije štetnih komponenata za razne režime rada motora predstavlja vrlo složen ali koristan aparat u traženju puta za

smanjenje udjela tih komponenata.

Ovdje će se ukazati na jedan način postavljanja proračuna za sve karakteristične režime rada motora, a rezultati će biti verificirani eksperimentom.

Proračun i eksperimenti provedeni su s motorom 128 A.064 na vozilu "Zastava 101".

2. KARAKTERISTIČNI REŽIMI RADA

U eksploataciji motora na motornom vozilu izražena je česta promjena režima rada. Pritom se mogu izdvojiti sljedeći karakteristični režimi rada: prazan hod, stacionarno opterećenje, ubrzanje i usporenje. Od tih režima sastavljen je i ciklus Europa-testa.

Općenito, mogući broj radnih režima motora, prema opterećenju, vrlo je velik i može ga predstavljati bilo koja točka unutar površine brzinske značajke za puno opterećenje.

Ovdje će se proračun emisije štetnih komponenata u ispušnim plinovima oto-motora provesti za režime koji su zastupljeni u Europa-testu. Proračun će se temeljiti na modelu jednog ciklusa u cilindru motora [1,2].

2.1. Prazan hod

Ovaj režim rada samo je jedan specifičan slučaj stacionarnog režima. Međutim, izdvaja se kao poseban režim, jer je vrlo čest u radu motora na vozilima. U Europa-testu na ovaj režim otpada 35,4% vremena od ukupnog vremena za cijeli ciklus.

Rad motora na praznom hodu obilježavaju neujednačeni i nepravilni radni ciklusi u cilindru, kao posljedica velike količine zaostalih plinova izgaranja iz prethodnog ciklusa. Tlak u cilindru tijekom usisa znatno je niži od okolišnjeg, jer je leptir karburatora praktično zatvoren. Stoga, za vrijeme preklapanja ventila, dolazi do vraćanja već izbačenih plinova izgaranja natrag u cilindar, razblažujući u velikoj mjeri svježu smjesu.

Takva smjesa ne omogućuje potpuni dođir svih čestica goriva s potrebnom količinom kisika, pa se u ispuhu povećava koncentracija ugljičnog monoksida. Zbog lokalnog nedostatka zraka izostaje ili se ne dešava izgaranje pa se u ispušnim plinovima pojavljuje veća koncentracija ugljikovodika.

Uvjeti na praznom hodu ne omogućuju stabilan rad motora sa siromašnom smjesom. Dakle, na praznom hodu je bogata smjesa, koja

se dobiva podešavanjem najmanje brzine vrtnje koljenastog vratila uza stabilan rad i što manje koncentracije ugljičnog monoksida (CO) i ugljikovodika (HC) u ispušnim plinovima, te najmanju potrošnju goriva.

Koncentracije CO i HC na praznom hodu su povećane, ali je njihova ukupna količina relativno mala zbog znatno manjeg protoka svježe smjese goriva i zraka nego na punom, odnosno djelomičnom opterećenju.

S obzirom na veliku količinu zaostalih plinova izgaranja u radnom mediju, temperatura izgaranja je relativno niska, a zbog bogate smjese u ispušnim plinovima je vrlo mala koncentracija dušičnih oksida (NO_x).

U proračunu emisije štetnih komponenata nije dovoljno izvesti samo proračun jednog ciklusa, jer bi to značilo da su uzastopni ciklusi u cilindru motora potpuno identični. Poznato je da su u radu motora prisutne varijacije ciklusa, koje su na praznom hodu osobito izražene. Stoga je proračun na praznom hodu proveden s varijacijama ciklusa. Obuhvaćeno je pedeset uzastopnih ciklusa. U proračunu su varirane sljedeće veličine: koeficijent viška zraka λ , trajanje izgaranja γ_z i značajka izgaranja m . Prosječne su vrijednosti tih veličina: $\lambda = 0,976$, $\gamma_z = 55^\circ\text{KV}$ i $m = 5,4$. Tlak u cilindru za vrijeme usisa uzet je prema analizi indikatorskih dijagrama $p_u = 0,232$ bar. Kut pretpaljenja je $\Phi = 10^\circ\text{KV}$ prije GMT, a brzina vrtnje koljenastog vratila $n = 1000$ o/min.

Rezultati proračuna i mjerenja predočeni su u tablici 1. Vidljivo je da se proračunom dobivaju zadovoljavajući rezultati. Treba još jednom istaknuti da su to rezultati proračuna s varijacijama ciklusa, jer rezultati proračuna za jedan ciklus, s prosječnim veličinama koje definiraju ciklus, bitno odstupaju od izmjerenih veličina.

Tablica 1. Koncentracije štetnih komponenata u ispušnim plinovima dobivene proračunom i mjerenjem na praznom hodu

Način dobivanja rezultata	Koncentracija komponenata u ispušnim plinovima		
	CO [%]	NO _x [ppm]	HC [ppm]
Proračun	1,25	367	375
Mjerenje	1,30	340	400

2.2. Stacionarno opterećenje

Stacionarnim opterećenjem smatra se režim s ustaljenom brzinom vrtnje koljenastog vratila i ustaljenim opterećenjem.

U eksploataciji na motornim vozilima motor može raditi u širokom spektru stacionarnih opterećenja, ovisno o vanjskim otporima koji na njega djeluju. U Europa-testu definirana su četiri stacionarna režima pod opterećenjem koji ukupno sudjeluju s 29,2% u vremenu trajanja

jednog ciklusa vožnje.

Bilo koji režim stacionarnog opterećenja, za potrební srednji efektivni tlak i brzinu vrtnje, može se obuhvatiti proračunom ciklusa u motoru uz poznavanje koeficijenta viška zraka, kuta pretpaljenja, tlaka usisa u cilindru, trajanja izgaranja i značajke izgaranja.

Koeficijent viška zraka i kut pretpaljenja za sve režime rada motora obično su poznati.

Tlak usisa u cilindru dobiva se na temelju srednjeg efektivnog tlaka, s obzirom na to da između ta dva tlaka postoji visoka korelacijska ovisnost [1].

Trajanje izgaranja i značajka izgaranja određuju se iz relacija koje se dobivaju analizom indikatorskih dijagrama [1].

Proračunom koncentracije toksičnih komponenata u ispušnim plinovima obuhvaćaju se varijacije ciklusa u funkcionalnoj ovisnosti bogatstva smjese goriva i zraka, trajanja izgaranja i značajke izgaranja.

Rezultati proračuna i mjerenja za stacionarne režime iz Europa-testa dani su u tablici 2. Izmjerene vrijednosti za HC dobivene su postupkom FID (Flame Ionisation Detektor).

Tablica 2. Koncentracije štetnih komponenata za stacionarne režime iz Europa-testa

Način dobivanja rezultata	Stacionarni režim	Koncentracije komponenata u ispušnim plinovima				
		n [o/min]	p _e [bar]	CO [%]	NO _x [ppm]	HC [ppm]
Proračun		2064	0,53	1,58	682	586
		2747	0,97	1,75	694	493
		2650	1,93	0,31	1660	564
		1855	1,61	0,67	1180	560
Mjerenje		2064	0,53	1,65	550	630
		2747	0,97	1,80	620	570
		2650	1,93	0,35	1500	550
		1855	1,61	0,70	1050	630

Rezultati proračuna mogu se smatrati zadovoljavajućim u odnosu na izmjerene, s obzirom na veliki broj utjecajnih činitelja na rezultate mjerenja i proračuna.

2.3. Ubrzanje

Ubrzanje pripada u neustaljene režime, u kojih trenutne i prosječne vrijednosti promatranih veličina ovise o vremenu na neperiodičan način. Zbivanja u cilindru postaju složenija u odnosu na ustaljeni režim, s ciljem da se model što više približi realnom ciklusu. Najsloženiji modeli postaju izuzetno glomazni, te zahtijevaju dugi rad računala. Oni ipak ne daju bitno kvalitetnije rezultate u odnosu na prihvatljivo pojednostavnjeni model.

Ovdje se radni ciklus pri ubrzanju opisuje istim modelom kao i za ustaljeni režim, uz

traženje i postavljanje pravilnih ulaznih veličina koje bitno utječu na sastav ispušnih plinova.

Na koncentraciju štetnih komponenata u ispušnim plinovima najveći utjecaj imaju: brzina otvaranja leptira, otvorenost leptira karburatora i brzina vrtnje koljenastog vratila.

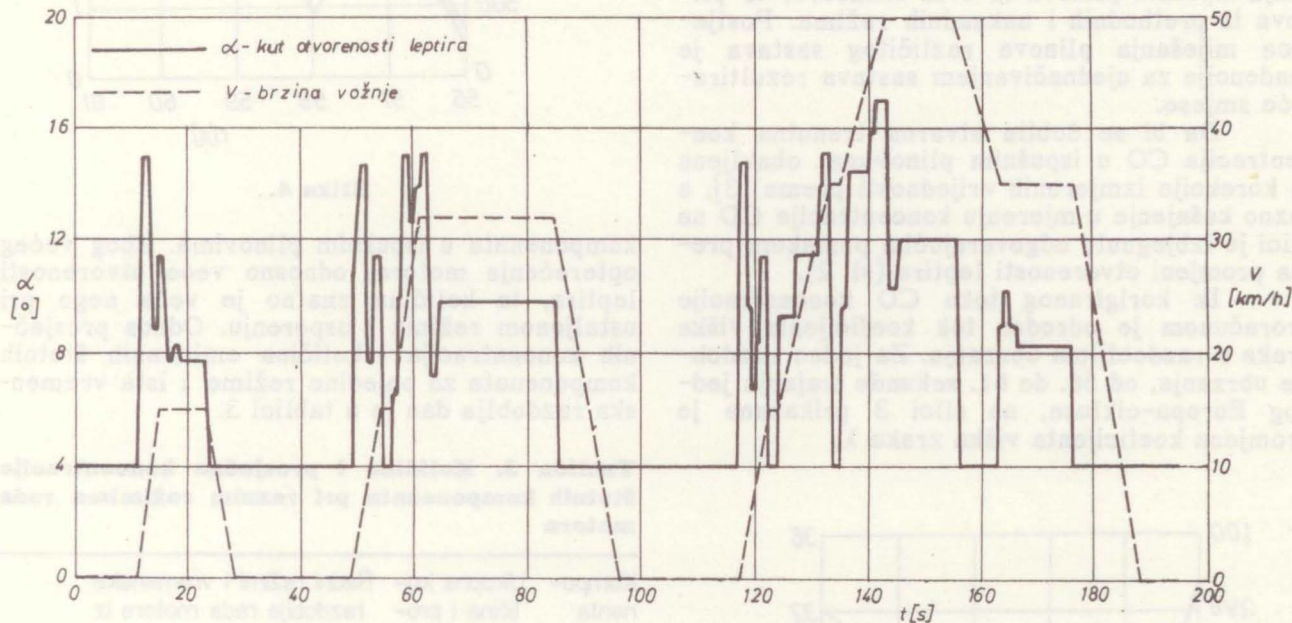
Naglim otvaranjem leptira pumpicom se ubrizga prevelika količina goriva, pa jedan dio goriva neisparen odlazi sa strujom zraka u cilindre, što stvara dodatno obogaćenje smjese. Obogaćivanje smjese ovisi i o veličini početne otvorenosti leptira, te o brzini vrtnje.

Za teoretsko opisivanje ciklusa u motoru

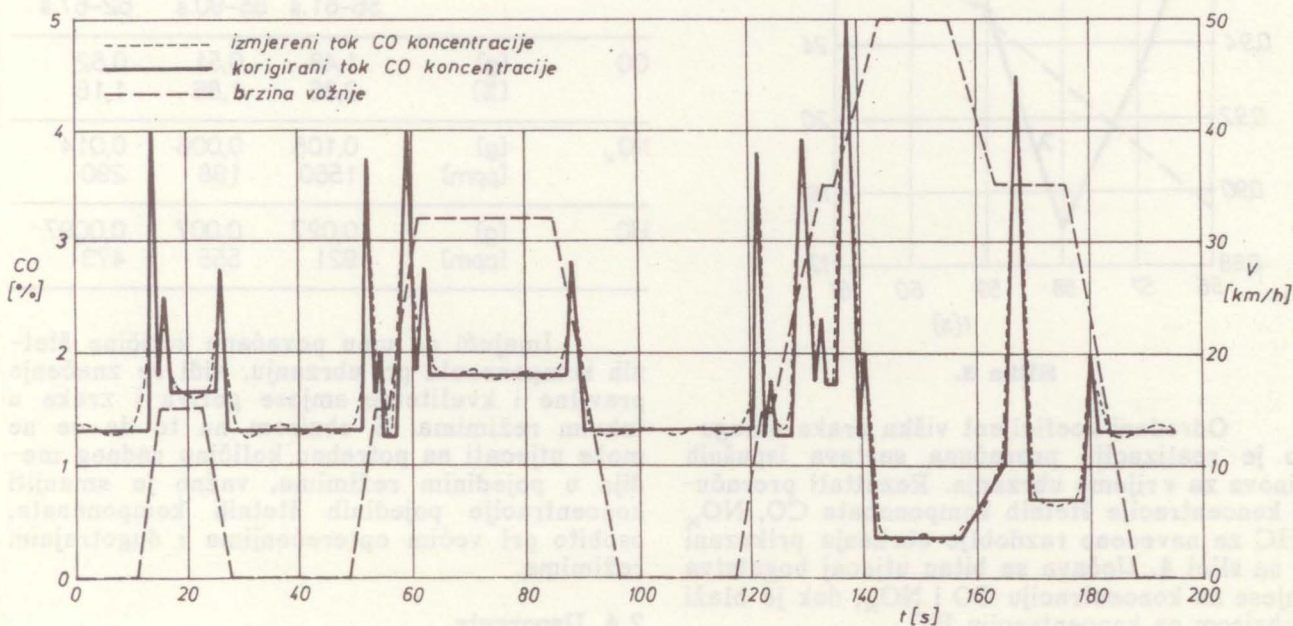
najveći utjecaj na sastav ispušnih plinova ima bogatstvo smjese goriva i zraka koja ulazi u cilindre. Poznajući zakon promjene bogatstva smjese moguće je proračunati sastav ispušnih plinova.

U ciklusu Europa-testa ubrzanja zauzimaju 18,5% vremena od ukupnog vremena trajanja testa. Početke svih ubrzanja tijekom ciklusa Europa-testa obilježava naglo otvaranje leptira (sl. 1). Nakon postizanja željenog ubrzanja otvorenost leptira varira da bi se održalo potrebno ubrzanje.

S obzirom na to da je u ovim režimima



Slika 1.



Slika 2.

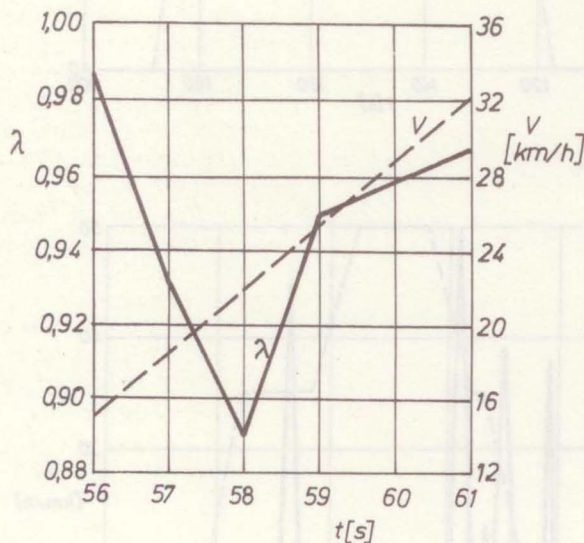
bogata smjesa, najpogodnije je određivati koeficijent viška zraka na temelju izmjerene koncentracije CO u ispušnim plinovima (sl. 2). Na slici se uočavaju skokovi koncentracije CO pri ubrzanjima, što znači obogaćivanje smjese pri naglim otvaranjima leptira.

Mjerni uređaji, kojima se analiziraju ispušni plinovi, reagiraju pri kontinuiranoj analizi sa zakašnjenjem zbog vremena potrebnog za prolaz plina kroz vodove i zbog tromosti instrumenata.

Pri skokovitim promjenama koncentracija na izlazu iz cilindra mjerni uređaji pokazuju smanjenu vršnu koncentraciju. To je zbog miješanja ispušnih plinova iz svih cilindara, te plinova iz prethodnih i naknadnih režima. Posljedica miješanja plinova različitog sastava je tendencija za ujednačivanjem sastava rezultirajuće smjese.

Da bi se dobila stvarna trenutna koncentracija CO u ispušnim plinovima, obavljena je korekcija izmjerenih vrijednosti prema [3], a fazno kašnjenje u mjerenju koncentracije CO na slici je izbjegnuto odgovarajućim pomakom prema promjeni otvorenosti leptira (sl. 2).

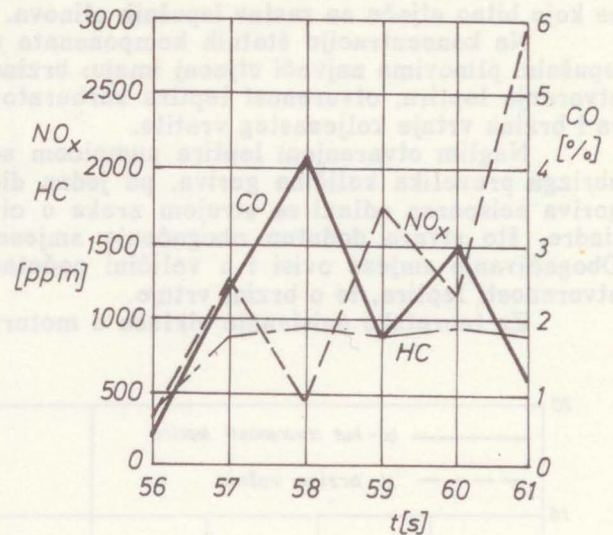
Iz korigiranog toka CO koncentracije proračunom je određen tok koeficijenta viška zraka u razdobljima ubrzanja. Za jedno razdoblje ubrzanja, od 56. do 61. sekunde trajanja jednog Europa-ciklusa, na slici 3 prikazana je promjena koeficijenta viška zraka λ .



Slika 3.

Određeni koeficijent viška zraka omogućio je realizaciju proračuna sastava ispušnih plinova za vrijeme ubrzanja. Rezultati proračuna koncentracije štetnih komponenta CO, NO_x i HC za navedeno razdoblje ubrzanja prikazani su na slici 4. Uočava se bitan utjecaj bogatstva smjese na koncentraciju CO i NO_x, dok je blaži s obzirom na koncentraciju HC.

U režimu ubrzanja osim koncentracije vrlo je važna ukupna količina emitiranih štetnih



Slika 4.

komponenta u ispušnim plinovima. Zbog većeg opterećenja motora, odnosno veće otvorenosti leptira, ta količina znatno je veća nego pri ustaljenom režimu i usporenju. Odnos prosječnih koncentracija i količina emitiranih štetnih komponenta za pojedine režime i ista vremenska razdoblja dan je u tablici 3.

Tablica 3. Količine i prosječne koncentracije štetnih komponenta pri raznim režimima rada motora

Komponenta	Ukupna količina i prosječna koncentracija	Radni režimi i vremenska razdoblja rada motora iz Europa-ciklusa		
		Ubrzanje: 56-61.s	Usporenje: 85-90.s	Stacionarni: 62-67.s
CO	[g]	1,48	0,51	0,52
	[%]	2,36	1,86	1,18
NO _x	[g]	0,105	0,006	0,014
	[ppm]	1560	198	290
HC	[g]	0,027	0,007	0,0097
	[ppm]	921	555	473

Imajući na umu povećane količine štetnih komponenta pri ubrzanju, vidi se značenje pravilne i kvalitetne smjese goriva i zraka u takvim režimima. S obzirom na to da se ne može utjecati na potrebnu količinu radnog medija u pojedinim režimima, važno je smanjiti koncentracije pojedinih štetnih komponenta, osobito pri većim opterećenjima i dugotrajnim režimima.

2.4. Usporenje

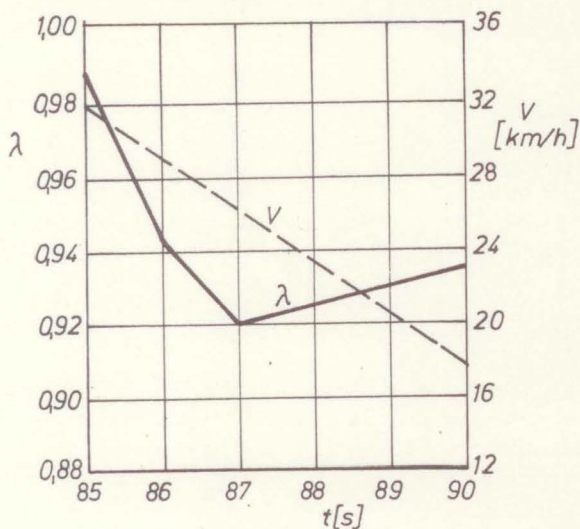
Usporenje ili kočenje motorom izaziva

znatne nepogodnosti u odvijanju procesa izgaranja, a time i povećanu koncentraciju štetnih komponenta u ispušnim plinovima.

Zbog zatvaranja leptira smanjuje se tlak u usisnom kolektoru što uzrokuje isparavanje kondenziranoga goriva na stijenkama usisnih kanala i obogaćenja smjese goriva i zraka.

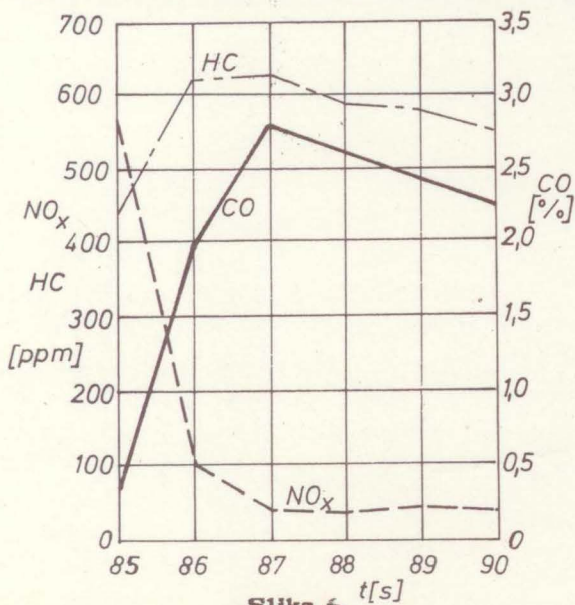
Ovaj režim je definiran kao prazan hod s većim nametnutim brzinama vrtnje. Značajka takvog režima je vrlo razrijeđena smjesa u cilindru izazvana niskim tlakom i velikom količinom zaostalih plinova izgaranja.

Proračun niza ciklusa u cilindru motora za jedno razdoblje usporenja obavljen je na temelju proračunanoga koeficijenta viška zraka (sl. 5), a iz snimljenog i korigiranog toka koncentracije CO za jedan Europa-ciklus (sl. 2).



Slika 5.

Dobivene vrijednosti koncentracija štetnih komponenta u ispušnim plinovima pri usporenji u razdoblju od 85. do 90. s jednog ciklusa Europa-testa prikazane su na slici 6. Ukupne



Slika 6.

količine emitiranih komponenta u tom razdoblju i njihove prosječne koncentracije dane su u tablici 3. Uočavaju se male količine pojedinih komponenta u odnosu na druge režime rada motora. Razlog tomu je mala količina svježije smjese koja ulazi u cilindre.

3. ZAKLJUČAK

Proračun emisije štetnih komponenta u ispušnim plinovima oto-motora u pojedinim režimima omogućuje kvalitetniju analizu rada motora i njegovu optimalizaciju. Dobiveni rezultati pokazuju velike razlike u koncentraciji i ukupnoj emisiji štetnih komponenta u raznim režimima. Tako se emisija osobito povećava pri ubrzanju, kada se smjesa goriva i zraka obogaćuje, opterećenje povećava i općenito se pogoršavaju uvjeti u pripremi smjese i realizaciji ciklusa u samom cilindru motora. Povećana je koncentracija, a osobito ukupna količina, što ukazuje na potrebu da se tom režimu posveti posebna pažnja. Kvaliteta pripreme smjese goriva i zraka i njeno bogatstvo posebno su važni, jer izravno i znatno utječe na emisiju štetnih komponenta.

SUMMARY

HARMFUL OTTO ENGINE EXHAUST EMISSIONS IN CHARACTERISTIC OPERATION MODES

This paper deals with the method which makes it possible to complete an assessment of the harmful exhaust emission level of the Otto engine in different modes of operation. Thus the paper specifically reviews: idling, stationary loads, acceleration, and deceleration. The authors discuss the impact of input values in the process of assessment upon the output values. In the process, respective concentration as well as the total volume of toxic components in a given period have been established.

The assessment is based upon a complete estimate (computation) of a cycle in the engine cylinder while the load is selected from the system of the Europe-test. The results obtained have been verified in an experiment.

LITERATURA

- [1] J. ZAVADA: Matematički model određivanja sastava ispušnih plinova Ottovog motora u eksploatacijskim uvjetima rada. Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 1985.
- [2] J. ZAVADA: Modeliranje složenih režima rada otovog motora za određivanje emisije otrovnih komponenta. Strojstvo 28 (1986) 2, 75-82.
- [3] H. RICHTER: Messeinrichtung zur kontinuierlichen Ermittlung der Schadstoff-Massenemission bei stationären und instationären Motor-Betriebzuständen. Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschriften, Reihe 6, Nr. 56, 1979.