

Dr.sc. JOSIP ZAVADA
 Dr.sc. IVAN MAVRIN
 Dr.sc. ERNEST BAZIJANAC
 Fakultet prometnih znanosti
 Faculty of Transport and Traffic Engineering
 Zagreb, Vukelićeva 4

Promet i čovjekova okolina
 Prethodno priopćenje
 UDK: 621.43.068 : 531.01 : 621.434.
 Primljeno - Accepted: 04.02.1995.
 Prihvaćeno - Approved: 24.04.1995.

MODEL ZA IZRAČUNAVANJE EMISIJE ŠTETNIH SASTOJAKA MOTORNIH VOZILA S OTO-MOTOROM I KATALIZATOROM

MODELL ZUR BERECHNUNG DER ABGASEMISSIONEN VON FAHRZEUGEN MIT OTTO-MOTOR UND KATALYSATOR

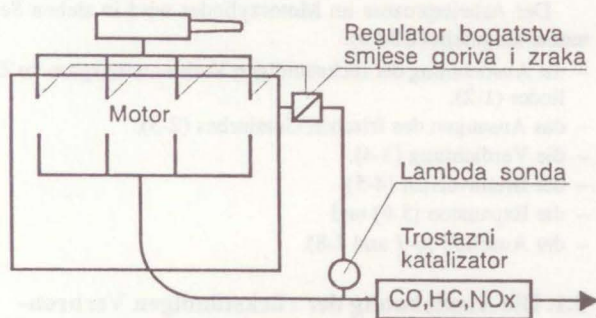
SAŽETAK

U radu je predstavljen kompleksan model za izračunavanje emisije štetnih sastojaka motornih vozila pogonjenih oto-motorom i opremljenih trostaznim katalizatorom. Proračunski model sadrži više segmenata. Polaznu osnovu čini određivanje opterećenja motora, tj. okretnog momenta i brzine vrtnje da bi se svladali nametnuti otpori motornom vozilu. Zatim slijedi kompletan termodinamički proračun procesa u cilindru motora za potrebu opterećenje. Emisija štetnih sastojaka pri izlasku iz motora izračunava se iz ravnotežnog stanja plina na završetku izgaranja. Na kraju se izračunava emisija štetnih sastojaka po izlasku iz trostaznoga katalizatora uzimajući u obzir njegovu efikasnost.

U ovom radu modelom je proveden proračun za vozilo VW Passat pogonjeno oto-motorom radnog volumena 2000 cm³ i opremljeno trostaznim katalizatorom. Pritom su radni režimi uzeti prema voznom ciklusu Europa-testa.

1. UVOD

Emisija štetnih sastojaka s ispušnim plinovima motornih vozila zakonskim je propisima vrlo nisko propisana. S obzirom na to da se tako niske emisije ne mogu postići poduzimanjem mjera na samom motoru, ispušni se plinovi moraju naknadno obrađivati. U tom smislu najpovoljnije je primjenjivati trostazni katalizator (sl. 1.), koji pri stehiometrijskoj smjesi ima vrlo veliku efikasnost smanjivanja emisije štetnih sastojaka (sl. 2.) [1]. Vrlo važnu ulogu pritom ima uređaj za napajanje gorivom koji mora osigurati stehiometrijsku smjesu goriva i zraka ($\lambda \approx 1$).



Slika 1. Principijelna shema motora s trostaznim katalizatorom
 Bild 1. Funktionsprinzip eines Motors dem geregelten Dreibege-Katalysator

A MODEL FOR CALCULATION OF EMISSION OF HARMFUL COMPONENTS FROM MOTOR VEHICLES WITH OTTO MOTOR AND CATALYST

The Article offers a complete model for calculation of emission of harmful components from motor vehicles driven by Otto motor and supplied with three-way catalyst. The calculation model contains several parts. The starting base makes the determination of load of the motor, i.e. torque and speed in order to overcome the imposed resistance of driving. Then there follows a complete thermodynamic calculation process with the motor cylinder for the necessary load. Emission of harmful components at the motor outlet is calculated from the balance state of gas at the combustion end. Finally emission of harmful components after the three-way catalyst outlet taking into account its efficiency.

Using this model calculation for vehicle VW Passat driven by Otto motor of volume 2000 cm³ with a three-way catalyst performed in the article. Working regimes are taken according to the vehicle cycle of the Europe-test.

1. EINLEITUNG

Die Schadstoffemissionen für Fahrzeuge sind gesetzlich sehr niedrig vorgeschrieben. So niedrige Emissionen können mit Massnahmen am Motorzylinder selbst nicht erzielt werden, daher ist es notwendig die Motorenabgase nachzubehandeln. Der geregelte Dreibege-Katalysator stellt das, zur Zeit, wirkungsvollste System zu dieser Nachbehandlung dar (Bild 1). Im Bereich des Luftkraftstoffverhältnisses $\lambda \approx 1$ hat der Dreibege-Katalysator ausreichend hohe Konvertierungsgrade (Bild 2) [1]. Es bedarf jedoch eines aufwendigen Regelsystems zur Gemischbildung, um optimale Ergebnisse der Abgasreinigung zu erzielen.

Schadstoffemissionen können durch ein Messverfahren oder eine Berechnung bestimmt werden, was, im zweiten Fall ein wirkungsvolles Mittel zur preiswerteren und schnelleren Bestimmung der Einflussgrößen an die Schadstoffemissionen, d.h. zur Optimierung und Gestaltung des Motors wäre. Zur Umfassung aller Einflussgrößen in der Berechnung ist es notwendig ein komplexes mathematisches Modell vorzusetzen.

Wenn ein Ausgangspunkt die Motorbelastung ist, wird eine thermodynamische Berechnung des Arbeitprozesses im Motorzylinder festgesetzt, um Motorabgaskonzentrationen zu bestimmen. Danach werden die Emissionsveränderungen der Abgaskomponenten im Katalysator, als Ausgangswerte, berechnet und mit den, gesetzlich vorgeschriebenen Werte verglichen.

Emisija štetnih sastojaka može se odrediti mjerenjem i proračunom. Proračun je vrlo uspješno sredstvo da se jeftinije i brže istraže utjecajne veličine na emisiju štetnih sastojaka, odnosno da se optimira konstrukcija motora. Da bi se u proračunu obuhvatile sve utjecajne veličine na emisiju štetnih sastojaka mora se postaviti vrlo kompleksan matematički model.

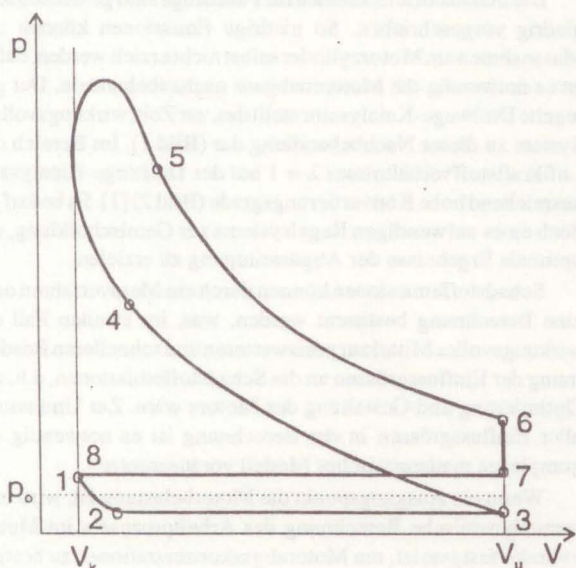
Polazeći od opterećenja motora, postavlja se termodinamički proračun procesa u cilindru motora, da bi se odredila koncentracija štetnih sastojaka u ispušnim plinovima na izlasku iz motora. Potom se proračunava promjena koncentracije tih sastojaka u katalizatoru i određuju izlazne vrijednosti koje se mjere i podliježu zakonskim ograničenjima.

2. TERMODINAMIČKI PROCES U CILINDRU MOTORA

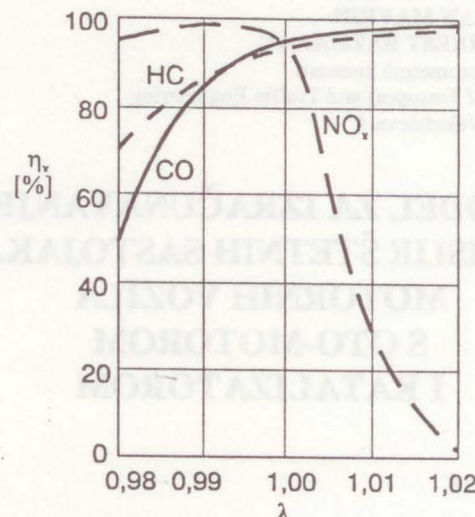
Cijeli ciklus u cilindru motora često se u proračunima vrlo pojednostavnjuje zbog njegove izrazite složenosti u pogledu teoretskog opisa. Riječ je o problemima strujanja pri izmjeni radnog medija, složenosti izmjene topline i vrlo složenom procesu izgaranja s promjenom sastava radnog medija. Uzimaju li se svi elementi u matematičkom modelu, tada on postaje vrlo složen i glomazan, a za njegovo odvijanje na računalo potrebno je znatno vrijeme. Stoga je u modelu koji se ovdje postavlja učinjen kompromis radi dobivanja zadovoljavajućih rezultata uz primjereno manji opseg proračuna.

Izmjena radnog medija računa se na osnovi njegova toplinskog stanja ne uzimajući u obzir probleme strujanja. U procesu izgaranja ne računa se s kinetikom kemijskih reakcija, nego se na kraju procesa izgaranja, prema toplinskom stanju radnog medija, određuje ravnotežno stanje plina i njegov sastav. Rezultati u odnosu na proračun kinetike neznatno odstupaju, ali se opseg proračuna znatno smanjuje. To je prihvatljivo jer su odstupanja unutar pogrešaka koje mogu nastati drugim pretpostavkama rubnih uvjeta u proračunu.

U postavljanju modela za proračun, ciklus u cilindru motora podijeljen je u sedam odsječaka (sl. 3.):



Slika 3. Shematski p-V dijagram ciklusa u cilindru motora
Bild 3. Schematische Darstellung des pV-Diagramms



Slika 2. Efikasnost katalizatora u ovisnosti o koeficijentu viška zraka
Bild 2. Konvertierungsgrade als Funktion des Luftkraftstoffverhältnisses

2. GRUNDLAGEN DES ARBEITPROZESSES IM MOTORZYLINDER

Die theoretische Beschreibung der Arbeitprozesses im Motorzylinder ist sehr kompliziert, deswegen werden, in Berechnungen, oft Vereinfachungen durchgeführt. Es geht um Strömungsprobleme während der Auswechslung des Arbeitsmediums, den Wärmeübergang zwischen Arbeitsmedium und Zylinderwände, und den komplexen Verbrennungsvorgang. Werden alle Elemente berücksichtigt, wird das Berechnungsmodell sehr kompliziert, umfangreich und zeitfordernd. Um zufriedenstellende Ergebnisse zu bekommen wird, bei der Modellierung des Motorprozesses ein Kompromiss eingegangen.

Die Auswechslung des Arbeitsmediums wird aufgrund des Wärmestandes, ohne Berücksichtigung der Strömungsprobleme, berechnet. Nach Berechnung des Verbrennungsprozesses wird der Gleichgewichtszustand des Gases und seine Zusammensetzung bestimmt. Die Ergebnisse weichen, in Bezug auf die kinetische Berechnung, nur geringfügig ab, aber der Berechnungsumfang wird erheblich vermindert. Abweichungen, im Sinne von Fehlern die durch andere Voraussetzungen der Randbedingungen einsetzen können, sind annehmbar.

Der Arbeitsprozess im Motorzylinder wird in sieben Segmente aufgeteilt (Bild 3):

- die Ausdehnung der rückständigen Verbrennungsgase im Zylinder (1-2),
- das Ansaugen des frischen Gemisches (2-3),
- die Verdichtung (3-4),
- der Brennverlauf (4-5),
- die Expansion (5-6) und
- der Auschub (6-7 und 7-8).

2.1. Die Ausdehnung der rückständigen Verbrennungsgase im Zylinder (1-2), die Verdichtung (3-4) und die Expansion (5-6)

Diese drei Segmente des Motorenprozesses, die sich zwischen den genannten Punkten, entsprechend Bild 3 ablaufen, wer-

- ekspanzija zaostalih plinova izgaranja (1-2)
- usis svježih smjese (2-3)
- kompresija (3-4)
- izgaranje (4-5)
- ekspanzija (5-6)
- ispuh (6-7 i 7-8)

2.1. Ekspanzija zaostalih plinova izgaranja (1-2), kompresija (3-4) i ekspanzija (5-6)

Ova tri segmenta ciklusa u cilindru motora, koji se odvijaju između navedenih točaka prema slici 3., opisuju se istim sustavom diferencijalnih jednadžbi.

Iz diferencijalnih jednadžbi (1), (2) i (3) određuje se temperatura radnog medija, a iz jednadžbe (4) tlak radnog medija. Sve veličine u jednadžbama moraju se definirati prema termodinamičkim zakonima uzimajući u obzir da je radni medij smjesa više plinskih sastojaka.

2.2. Usis (2-3)

Usis svježih smjese odvija se između točaka 2 i 3 prema slici 3. Taj se proces odvija uz promjenu mase radnog medija i pretpostavljeni konstantni tlak, što se opisuje energetskom jednadžbom (5).

Iz diferencijalnih jednadžbi (5) i (6) određuje se temperatura radnog medija, a masa iz jednadžbe (7).

2.3. Izgaranje (4-5)

Proces izgaranja obuhvaća segment 4-5 prema slici 3. i naj-složeniji je dio cijelog ciklusa u cilindru motora. Opisuje se jednadžbama od (1) do (5). Pritom je vrlo važno definirati zakon oslobađanja topline zbog izgaranja. Ukupna promjena izmije-njene topline definira se jednadžbom (8).

Tu se prvi dio odnosi na izmijenjenu toplinu između radnog medija i stijenke cilindra i računa se po jednadžbi (3), a drugi dio se odnosi na oslobođenu toplinu izgaranjem prema jednadžbi (9).

Funkcija x poznata je kao Vibeova funkcija, a računa se prema izrazu (10).

Trajanje izgaranja i značajka izgaranja složene su funkcije brzine vrtnje motora, bogatstva smjese goriva i zraka, tlaka i temperature radnog medija u cilindru motora [2]. Te utjecajne veličine moraju se uzeti u obzir kada se proračun provodi za različite radne režime motora.

2.4. Ispuh (6-7 i 7-8)

Ispuh se promatra kao trenutačni pad tlaka zbog izlaska dijela plinova izgaranja kroz ispušne ventile kada se stap nalazi u DMT (odsječak 6-7 na slici 3.) i istiskivanje plinova izgaranja iz cilindra pri kretanju stapa od DMT do GMT uz pretpostavljeni konstantni tlak (odsječak 7-8 na slici 3.).

Za trenutačni pad tlaka na odsječku 6-7 pretpostavlja se adijabatska ekspanzija preostalog plina u cilindru, pa će temperatura na kraju toga procesa biti određena jednadžbom (11).

Pritom se indeksi odnose na navedene veličine u odgovarajućim točkama p-V dijagrama (sl. 3.), a κ je eksponent adijabatske promjene (odnos specifičnih toplota pri konstantnom tlaku i konstantnom volumenu). Masa preostalog plina u cilindru određuje se iz jednadžbe stanja idealnog plina za promatranu točku.

$$\frac{dQ}{d\alpha} = m \frac{du}{d\alpha} + p \frac{dV}{d\alpha} \quad (1)$$

$$\frac{du}{d\alpha} = c_v \frac{dT}{d\alpha} \quad (2)$$

$$\frac{dQ}{d\alpha} = \frac{\alpha_k \cdot A_s}{360 \cdot n} (T_s - T) \quad (3)$$

$$p = \frac{m \cdot R \cdot T}{V} \quad (4)$$

$$\frac{d}{d\alpha} (m \cdot i) = \frac{dQ}{d\alpha} + \frac{d}{d\alpha} (m \cdot i_{ss}) \quad (5)$$

$$\frac{di}{d\alpha} = c_p \frac{dT}{d\alpha} \quad (6)$$

$$m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \quad (7)$$

$$\frac{dQ}{d\alpha} = \frac{dQ_s}{d\alpha} + \frac{dQ_i}{d\alpha} \quad (8)$$

$$\frac{dQ_i}{d\alpha} = \frac{\xi \cdot H_d}{(1 + \lambda \cdot L_o) (1 + \gamma)} \frac{dx}{d\alpha} \quad (9)$$

$$x = 1 - e^{-6,908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_s}\right)^{m_v+1}} \quad (10)$$

$$T_7 = T_6 \left(\frac{p_7}{p_6}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad (11)$$

$$m \frac{di}{d\alpha} = \frac{dQ}{d\alpha} \quad (12)$$

$$m_c = m_6 - m_8 \quad (13)$$

$$m_{ip} = m_c \frac{n \cdot z}{2} \quad (14)$$

den mit dem gleichen Differentialgleichungssystem (1 bis 4) beschrieben.

Aus den Differentialgleichungen (1), (2) und (3) wird die Temperatur, und aus der Gleichung (4) der Druck des Arbeitsmediums bestimmt. Alle Größen in der Gleichungen werden gemäss den thermodynamischen Gesetzen definiert, während das Arbeitsmedium eine Mischung von mehreren Gaskomponenten ist.

2.2. Das Ansaugen des frischen Gemisches (2-3)

Das Ansaugen des frischen Gemisches wird bei konstantem Druck und einer veränderten der Arbeitsmediumsmasse durchgeführt. Der Ansaugdruck ist von Motor-belastung und -drehzahl abhängig. Während diesem Prozess werden die Temperatur aus Gleichungen (5) und (6) und die Masse des Arbeitsmediums aus Gleichung (7) berechnet.

2.3. Der Brennverlauf (4-5)

Der Verbrennungsprozess ist der komplizierteste Teil des ganzen Motorzyklus. Er wird mit den Gleichungen (1) bis (5) beschrieben, wobei sehr wichtig ist dass das Gesetz der Wärme-freieung definiert wird.

Der Wärmeübergang wird mit Gleichung (8) definiert. Das erste Glied dieser Gleichung bezieht sich auf den Wärmeüber-

Istiskivanje plinova izgaranja na odsječku 7-8 opisuje se energetskom jednadžbom (12).

Masa preostalog plina u cilindru određuje se iz jednadžbe stanja idealnog plina za svaki promatrani trenutak.

Za jedan proračun ciklusa u motoru prikazan je p-V dijagram na slici 4. Podaci za proračun uzeti su za oto-motor radnog volumena 1984 cm³ (radni volumen jednog cilindra iznosi 496 cm³) ugrađenog na vozilo VW Passat. Za ulazne veličine djelomičnog opterećenja motora: tlak usisa od 0,5 bar i brzinu vrtnje od 2430 o/min, dobiven je okretni moment od 61,3 Nm i snaga od 15,6 kW.

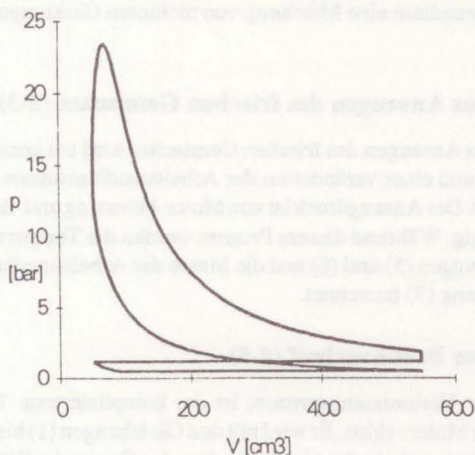
Model proračuna ciklusa u cilindru motora postavljen je tako da je za unesene podatke za konkretan motor dovoljno unijeti samo usisni tlak, brzinu vrtnje motora i koeficijent viška zraka.

Proračunom se dobivaju svi parametri koji obilježuju određeni režim rada motora. Međutim, za proračun sastava plinova izgaranja iz ravnotežnog stanja potrebni su podaci o tlaku i temperaturi plinova u cilindru motora na kraju izgaranja, a za određivanje masenog protoka i konačno određivanje ukupne količine pojedinih sastojaka nakon određenog vremena vožnje potrebno je odrediti masu plinova koji se izbacuju iz cilindra pri jednom ciklusu. Masa ispušnih plinova koja se izbacuje iz jednog cilindra po jednom ciklusu određuje se jednadžbom (13).

Pritom je m_6 masa plina na kraju ekspanzije, m_8 masa zaostalih plinova u cilindru na kraju ispuha. Maseni protok ispušnih plinova pri određenoj brzini vrtnje i za ukupni broj cilindara z određuje se jednadžbom (14).

3. ODREĐIVANJE RAVNOTEŽNOG STANJA PLINA

Ravnotežno stanje plina, odnosno njegov sastav, određuje se na osnovi bogatstva smjese goriva i zraka za izgaranje, temperature i tlaka plina te vrste goriva. Te veličine poznate su iz režima rada motora i proračuna ciklusa u cilindru motora. Tako je bogatstvo smjese određeno koeficijentom viška zraka, temperatura i tlak su odgovarajuće vrijednosti na kraju izgaranja u cilindru motora, a vrsta goriva je benzin. Prema složenom sastavu benzina od velikog broja ugljikovodika proračunom je dobiveno da bi on odgovarao prosječnom ugljikovodiku C_xH_y , pri čemu je $x=6,96$ a $y=12,44$.



Slika 4. p-V dijagram ciklusa u cilindru motora dobiven proračunom

Bild 4. pV-Diagramm entsprechend der Berechnung

gang zwischen Arbeitsmedium und Brennraumwand, und wird mit Gleichung (3) berechnet. Das zweite Glied wird aus Gleichung (9) berechnet. Die Funktion x ist bekannt als Vibe-Funktion und wird nach Gleichung (10) definiert.

Brenndauer und Kennwert des Verbrennungscharakters sind zusammengesetzte Funktionen und abhängig von Motordrehzahl, Luftkraftstoffverhältnis, Zylinderdruck und -temperatur [2].

2.4. Der Ausschub (6-7 und 7-8)

Der Ausschub wird zweifach betrachtet: Zuerst ein momentaner Druckabfall, wegen der ausgelassenen Brenngasmenge, wenn der Kolben sich im UT findet, (das Segment 6-7 in Bild 3); zweitens der Ausstoss des Restgases aus dem Zylinder während sich der Kolben von UT bis OT bewegt, bei konstantem Druck (das Segment 7-8 in Bild 3).

Für den momentanen Druckabfall am Segment 6-7 wird eine adiabatische Expansion des Restgases im Zylinder vorausgesetzt. Die Temperatur am Ende dieses Prozesses wird aus der Gleichung (11) und die Restgasmasse im Zylinder nach der Gleichung (7) berechnet.

Der Ausstoss des Restgases am Segment 7-8 wird mit energetischer Gleichung (12) beschrieben. Die Restgasmasse im Zylinder für jeden Moment wird aus Gleichung (7) ausgerechnet.

Für eine Berechnung des gesamten Motorprozesses ist das pV-Diagramm in Bild 4 dargestellt. Die Angaben beziehen sich auf den Otto-motor des Hubvolumens von 1984 cm³ (Hubvolumen pro Zylinder beträgt 496 cm³), der im Fahrzeug VW-Passat eingebaut wird. Ausgangsgrößen der teilweisen Motorbelastung für den Ansaugdruck von 0,5 bar und die Drehzahl von 2430 min⁻¹, sind ein Drehmoment von 61,3 Nm und eine Leistung von 15,6 kW.

Das Berechnungsmodell wurde so festgesetzt, dass die Werte für Ansaugdruck, Drehzahl und Luftkraftstoffverhältnis als Eingangsgrößen ausreichen. Alle Werte, die ein Motorarbeitspunkt kennzeichnen werden berechnet. Für die Berechnung der Zusammensetzung der Verbrennungsgase von dem Gleichgewichtszustand sind die Angaben über Druck und Temperatur am Verbrennungsende notwendig. Um die Massendurchströmung und die letztendliche Gesamtmasse einiger Komponenten nach bestimmter Fahrzeit zu berechnen, muss man die Gasmasse, die aus dem Zylinder nach dem Prozess ausgestossen wird, berechnen, Gleichung (13). Die Massendurchströmung des Verbrennungsgases bei bestimmter Motordrehzahl für Viertaktmotoren wird nach Gleichung (14) berechnet.

3. BESTIMMUNG DES GASGLEICHGEWICHTSZUSTANDES

Der Gleichgewichtszustand des Verbrennungsgases, d.h. seiner Zusammensetzung, wird aufgrund des Luftkraftstoffverhältnisses, der Gastemperatur, des Gasdrucks und der Kraftstoffzusammensetzung berechnet. Diese Größen werden aus Berechnung des Motorarbeitspunktes und des Motorprozesses bestimmt. Für die Gastemperatur und den Gasdruck sind die Werte am Verbrennungsende massgebend und Benzin ist der Kraftstoff. Benzin ist ein Kraftstoff zusammengesetzt aus mehreren Kohlenwasserstoffen, und durch Berechnung wird ein Kohlenwasserstoff C_xH_y durchschnittlicher Zusammensetzung $x=6,96$ und $y=12,44$ bestimmt.

$$C_x H_y + \left(x + \frac{y}{4}\right) O_2 + 3,762\lambda \left(x + \frac{y}{4}\right) N =$$

$$= x_1 H + x_2 O + x_3 N + x_4 H_2 + x_5 O_2 +$$

$$+ x_6 N_2 + x_7 OH + x_8 CO + x_9 NO +$$

$$+ x_{10} H_2O + x_{11} CO_2 + x_{12} NO_2 + x_{13} N_2O \quad (15)$$

$$y_1 Y_1 + y_2 Y_2 + y_3 Y_3 = y_4 Y_4 \quad (16)$$

$$K_{pj} = \frac{p_{Y_4}^{y_4}}{p_{Y_1}^{y_1} \cdot p_{Y_2}^{y_2} \cdot p_{Y_3}^{y_3}} \quad (17)$$

$$x_u = \sum_{i=1}^N x_i \quad (18)$$

$$p_i = \frac{x_i}{x_u} p \quad (19)$$

$$r_i = \frac{x_i}{x_u} \quad (20)$$

$$r_{HC} = \frac{r_C \cdot V_{zg} \cdot p}{R_{sm} \cdot T_{sm} \cdot m \cdot \sum_{i=1}^N r_i} \quad (21)$$

Opća jednadžba izgaranja referentnoga goriva $C_x H_y$ može se predočiti izrazom (15).

Proizvode izgaranja čini trinaest sastojaka s odgovarajućim molnim udjelima od x_1 do x_{13} , pri čemu su četiri osnovna elementa (C, H, O, N).

Za određivanje ravnotežnog stanja plina potrebno je postaviti sustav algebarskih jednadžbi čiji je broj jednak broju nepoznatih udjela pojedinih sastojaka, da bi sustav bio rješiv. Za odabiranje kemijskih reakcija i sustava jednadžbi za određivanje ravnotežnog stanja plina potrebno je od navedenih trinaest sastojaka odabrati neke kao neovisno promjenjive u sustavu.

Pri tom odabiru vodi se računa o sljedećim ograničenjima:

- broj neovisno promjenjivih jednak je broju osnovnih elemenata
- njihove koncentracije trebaju biti najveće u sustavu
- one se ne mogu povezati jednom jedinom kemijskom reakcijom
- svi osnovni elementi moraju biti sadržani i u neovisno promjenjivim.

Imajući na umu ta ograničenja, odabiru se kao neovisno promjenjivi sastojci CO_2 , H_2O , N_2 , a četvrta neovisna je CO za bogatu i stehiometrijsku smjesu, dok je O_2 za siromašnu smjesu.

Reakcije u kojima iz odabranih neovisnih sastojaka nastaju sve ostale mogu se općenito pisati u obliku (16).

Prematom načelu postavljase devet reakcija za bogatu i stehiometrijsku smjesu te devet reakcija za siromašnu smjesu. Za svaku reakciju piše se konstanta ravnoteže na osnovi parcijalnih tlakova pojedinih sastojaka prema jednadžbi (17).

Označi li se s x_i broj molova sastojaka i koji je nastao izgaranjem jednog mola goriva, tada je ukupan broj molova proizvoda izgaranja definiran jednadžbom (18).

Parcijalni tlak sastojaka i u plinskoj smjesi, koja je pod ukupnim tlakom p , određuje se jednadžbom (19).

Die allgemeine Verbrennungsgleichung für Kohlenwasserstoff wird mit Gleichung (15) beschrieben. Das Verbrennungsgas ist von dreizehn Komponenten mit entsprechenden molen Anteilen x_1 bis x_{13} zusammengesetzt. Dabei sind vier Grundelemente: C, H, O und N.

Der Gleichgewichtszustand des Gases wird durch Aufstellung des algebraischen Gleichungssystems, die Anzahl der Gleichungen entspricht der Anzahl der molen Anteile, errechnet. Zur Auswahl der chemischen Reaktionen und des Gleichungssystems es ist notwendig von den dreizehn Komponenten einige als unabhängige veränderliche im System zu auswählen. Bei dieser Auswahl müssen folgende Einschränkungen beachtet werden:

- die Anzahl der unabhängigen veränderlichen Komponenten ist gleich der Grundelementenanzahl,
- ihre Konzentrationen im System sollen die höchsten sein,
- sie können sich nicht nur mit einer einzigen Reaktion binden,
- alle Grundelemente müssen auch in den unabhängig veränderlichen Komponenten enthalten sein.

Wenn diese Einschränkungen berücksichtigt sind, werden als unabhängige veränderliche Komponenten CO_2 , H_2O , N_2 und CO für fettes und stöchiometrisches Gemisch, bzw. O_2 für mageres Gemisch ausgewählt.

Die Reaktion, in welcher aus unabhängigen Komponenten alle anderen entstehen, kann mit Gleichung (16) beschrieben. Entsprechend diesem Grundsatz werden neun Reaktionen für fettes und stöchiometrisches Gemisch, und neun für mageres Gemisch aufgestellt. Für jede Reaktion werden, aufgrund partieller Drucke einzelner Komponenten, Gleichgewichtskonstanten nach Gleichung (17) errechnet.

Die gesamte Molezahl des Verbrennungsgases entsprechend der Summe der Molezahl einzelnen Komponenten (x_i) die aus einer Kraftstoffmole entstand, und wird nach der Gleichung (18) berechnet.

Der partielle Druck einer Komponente im Gasgemisch p_i , des sich unter dem Gesamtdruck p befindet, wird nach der Gleichung (19) berechnet.

Durch Aufstellung der Gleichung (17) für jede Reaktion j , mit Anwendung der Gleichung (19), werden die Ausdrücke gegeben, die Molemenge abhängiger Komponenten als Funktionen unabhängiger Komponenten bestimmen. Mit diesem Verfahren bekommt man neun Gleichungen.

Die restliche Gleichungen bekommt man aus den Berechnungen für Kohlenstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Wasserstoff. Das sind die Gleichungen die die Molezahl der unabhängigen Komponenten bestimmen. Diese Gleichungen unterscheiden sich für das fette und stöchiometrische sowie magere Gemische.

Um ein System von vierzehn algebraischen nichtlinearen Gleichungen zu bekommen wird die Gleichung (18) hinzugefügt. Nach Lösen dieser Gleichungen werden die Molezahlen einzelner Komponenten im Gasgemisch bei Verbrennung eines Kraftstoffsmole errechnet.

Für das Lösen dieses Gleichungssystems muss man eine geeignete iterative Methode anwenden. Das Lösen ist sehr empfindlich zum Annahmewert unbekannter Größen. Deswegen es ist wichtig präzise Werte für die unabhängigen Variablen festzusetzen, weil diese Einfluss auf den konvergenten oder divergenten Iterativprozess haben. Nur gut angenommene Werte führen zur Konvergierung des Systems.

Der Volumenteil jeder Komponente im Gasgemisch wird schliesslich nach Gleichung (20) berechnet.

Postavljanjem jednadžbe (17) za svaku reakciju j , uz primjenu jednadžbi (19), dobivaju se izrazi za određivanje molnih količina ovisnih sastojaka, a u funkciji neovisnih. Na taj način dobiva se devet jednadžbi.

S obzirom na to da je potrebno odrediti udio svih 13 sastojaka i da bi se sustav algebarskih jednadžbi mogao riješiti, potrebno je postaviti još četiri jednadžbe. Te jednadžbe se dobivaju iz bilance tvari za ugljik, kisik, dušik i vodik. To su jednadžbe za određivanje broja molova neovisno promjenjivih sastojaka. One se razlikuju za bogatu i stehiometrijsku te siromašnu smjesu. Dodavanjem jednadžbe (18) u sustav od navedenih trinaest jednadžbi, dobiva se sustav od četrnaest algebarskih nelinearnih jednadžbi čijim rješenjem se dobivaju brojevi molova pojedinih sastojaka u plinskoj smjesi pri izgaranju jednog mola goriva.

Za rješavanje takvog sustava jednadžbi potrebna je prikladna iterativna metoda. Rješavanje je vrlo osjetljivo na pretpostavljene polazne vrijednosti nepoznatih veličina. Pritom je vrlo važno što preciznije pretpostaviti vrijednosti neovisno promjenjivih varijabli, jer one ponajprije utječu na to hoće li iterativni postupak konvergirati ili divergirati. Samo dobre polazne pretpostavke vode do konvergencije sustava, odnosno rješenja.

Volumenski udio svakog sastojka u plinskoj smjesi konačno je određen jednadžbom (20).

4. ODREĐIVANJE UDJELA UGLJIKOVODIKA U ISPUŠNIM PLINOVIMA

U postavljenom modelu ravnotežnog stanja plina za određivanje sastava ispušnih plinova ne egzistiraju ugljikovodici. Međutim, mjerenja pokazuju da se u ispušnim plinovima motora pojavljuju ugljikovodici. Oni nastaju zbog gašenja plamena na stijenkama cilindra te u porama između stapa i cilindra kao i između stapa i stapnih prstenova. Jedan dio ugljikovodika u ispušnim plinovima nastaje prestrujavanjem svježeg smjese u ispušne plinove pri preklapanju ventila. Potpuno obuhvaćanje nastajanja ugljikovodika matematičkim modelom veoma je složeno i zahtijeva prostorno opisivanje problema. Takav je model suviše složen i opsežan, pa se prilazi jednostavnijem pristupu u proračunu.

Za približno određivanje koncentracije ugljikovodika (volumenski udio ugljikovodika u plinovima izgaranja), nastalih gašenjem na hladnijim stijenkama prostora izgaranja, zadovoljavajuće rezultate daje izraz (21) [2].

$$\eta_{CC} = \frac{-0,118}{\lambda - 0,9776} + 102 \quad \text{-za } \lambda = 0,98 \div 1,02 \quad (22)$$

$$\eta_{HC} = \frac{-0,411}{\lambda - 0,968} + 106 \quad \text{-za } \lambda = 0,98 \div 1,02 \quad (23)$$

$$\eta_{NO} = \frac{0,269738}{\lambda^2 - 1,97852 \cdot \lambda + 0,981356} \quad \text{-za } \lambda = 0,98 \div 1,00 \quad (24)$$

$$\eta_{NO} = \frac{1,828}{\lambda - 0,9875} - 51,24 \quad \text{-za } \lambda = 1,00 \div 1,02 \quad (25)$$

$$\eta_i = \frac{K_{pi} - K_{ni}}{K_{pi}} \cdot 100 \quad (26)$$

$$K_{ni} = K_{pi} \left(1 - \frac{\eta_i}{100} \right) \quad (27)$$

$$K_{pi} = 100 \cdot r_i \quad (28)$$

4. BESTIMMUNG DES KOHLENWASSERSTOFFANTEIL IM MOTORABGAS

Im Modell des Gleichgewichtszustandes zur Berechnung der Zusammensetzung des Verbrennungsgases sind keine Kohlenwasserstoffe enthalten. Das Verbrennungsgas enthält Kohlenwasserstoffe und diese werden hier besonders berechnet.

Die Kohlenwasserstoffe entstehen durch die Löschung der Flamme an der Brennraumwand, in Öffnungen zwischen Zylinder und Kolben, sowie zwischen Kolben und Kolbenringen. Ein Teil der Kohlenwasserstoffe entsteht mit der Durchströmung des Frischgemisches ins Verbrennungsgas während der Überschneidungsphase. Eine mathematische Beschreibung der Entstehung der Kohlenwasserstoffe ist sehr kompliziert und fordert ein umfangreiches Modell. Deswegen wird hier ein einfacheres Modell angewendet.

Zur annäherenden Bestimmung der Kohlenwasserstoffkonzentration (des volumenanteils im Verbrennungsgas), die durch die Löschung der Flamme an der Brennraumwand entsteht, werden mit Gleichung (21) befriedigende Ergebnisse erreicht [2]. Dabei wird das gleiche Gemisch in der Lösungszone als auch vor der Verbrennung vorausgesetzt. Das Volumen der Lösungszone wird nach Messungen der Kohlenwasserstoffkonzentration für einen Motorbetriebspunkt bestimmt. Das so bestimmte Volumen der Lösungszone wird als konstant angesehen. In anderen Betriebspunkten haben das Luftkraftstoffverhältnis und die Zustandparameter grössten Einfluss auf die Kohlenwasserstoffkonzentration.

5. KONVERTIERUNGSGRAD DES KATALYSATORS

Bei Fahrzeugen mit Ottomotor werden in der Regel Dreiwege-Katalysatoren angewendet. Er hat die Eigenschaft, alle Schadstoffkomponenten (CO, HC und NO_x) gleichzeitig in hohem Masse zu verringern. Der geregelte Dreiwege-Katalysator erreicht im stöchiometrischen Bereich einen Konvertierungsgrad von über 90% (Bild 2). Da der Konvertierungsgrad ausser vom Luftkraftstoffverhältnis auch von Alter und Temperatur des Katalysators abhängig ist, gilt der dargestellte Konvertierungsgrad für Neuzustand und Betriebstemperaturen von über 300°C.

Die Schadstoffemission des Fahrzeugs wird aufgrund der Rohemission und des Konvertierungsgrades berechnet. Deswegen ist es notwendig eine analytische Beschreibung des Konvertierungsgrades für jede Komponente festzusetzen. Aufgrund von Bild 2 werden die Konvertierungsgrade als analytische Funktionen des Luftkraftstoffverhältnisses durch die Gleichungen (22), (23), (24) und (25) definiert.

Der Konvertierungsgrad wird durch die Gleichung (26) definiert, eine durchschnittliche Konzentration der Komponenten mit Gleichung (27). Dabei ist die durchschnittliche Konzentration der Komponente i vor dem Katalysator mit Gleichung (28) bestimmt.

Die errechnete durchschnittliche Konzentration K_{ni} hinter dem Katalysator ist eine augenblickliche Konzentration während das Kraftzeug fährt. Wie sich der Betriebszustand des Motors verändert, so verändert sich die augenblickliche Konzentration einiger Komponenten. Im gesamten Modell wird jeweils eine augenblickliche Konzentration der Schadstoffkomponenten be-

Pritom se pretpostavlja da se u zoni gašenja nalazi svježja smjesa, po sastavu jednaka onoj koja se nalazila u cilindru prije izgaranja. Volumen zone gašenja treba odrediti za jedan režim na osnovi snimljenih koncentracija ugljikovodika. Tako dobiven volumen zone gašenja može se držati približno konstantan, a da na koncentraciju ugljikovodika najveći utjecaj ima bogatstvo smjese i parametri stanja.

5. EFIKASNOST KATALIZATORA

Na vozilima s oto-motorima najčešće se primjenjuje trostazni katalizator, u prvom redu zbog njegove velike efikasnosti. Kako se vidi iz slike 1., efikasnost katalizatora veća je od 90% kada je koeficijent viška zraka smjese s kojom motor radi približno jednak jedinici. Osim o koeficijentu viška zraka, efikasnost katalizatora ovisi o njegovoj temperaturi i starosti. Prikazana efikasnost vrijedi za novi katalizator i zagrijan na radnu temperaturu ($t > 300^{\circ}\text{C}$).

U potpunom modelu proračuna emisije štetnih sastojaka koristi se efikasnost katalizatora da bi se na osnovi dobivene emisije iz motora odredila izlazna emisija vozila. Za primjenu u modelu mora se poznati grafički prikaz efikasnosti katalizatora izraziti u analitičkom obliku. Analizom slike 1. dobivaju se ovisnosti efikasnosti katalizatora o koeficijentu viška zraka u analitičkom obliku prema jednadžbama (22), (23), (24) i (25).

S obzirom na to da je efikasnost katalizatora definirana izrazom (26), bit će prosječna koncentracija sastojka i na izlazu iz katalizatora određena jednadžbom (27). Pritom je prosječna koncentracija sastojka i ispred katalizatora određena jednadžbom (28).

Dobivena prosječna koncentracija sastojka i K_{ni} iza katalizatora u postotku predstavlja trenutačnu koncentraciju tog sastojka pri vožnji vozila. Kako se režim rada motora tijekom vožnje mijenja, mijenja se i trenutačna izlazna koncentracija. U modelu se proračunava trenutačna koncentracija štetnih tvari da bi se dobila njihova ukupna količina nakon određenog vremena.

6. PRORAČUN EMISIJE ŠTETNIH SASTOJAKA ZA EUROPA-CIKLUS VOŽNJE

Proračun ciklusa u cilindrima motora provodi se za konkretni radni režim motora. On je određen okretnim momentom i brzinom vrtnje motora. Da bi se te veličine odredile, polazi se od otpora vožnje i brzine vožnje vozila.

Potrebna snaga motora za pogon motornog vozila definirana je jednadžbom (29). Iz potrebne snage određuje se okretni moment motora prema jednadžbi (30), a iz brzine vožnje određuje se brzina vrtnje motora iz jednadžbe (31).

Potrebni okretni moment i brzina vrtnje motora u ovom radu odredit će se za Europa-ciklus vožnje, koji definira potrebnu brzinu vožnje vozila u funkciji vremena (sl. 5.). U proračunu su uzeti potrebni podaci za vozilo VW Passat.

Da bi se proračunom ciklusa u cilindrima motora dobio potrebni okretni moment pri odgovarajućoj brzini vrtnje motora, mora se naći ovisnost okretnog momenta o usisnom tlaku u cilindru motora, jer je on jedna od ulaznih veličina proračuna. Analizom proračunskih veličina dobiva se tražena ovisnost kako je to pokazano na slici 6.

rechnet. Die Summe der jeweiligen augenblicklichen Konzentrationen ergibt die letztendliche Konzentration einer bestimmten Fahrdauer.

6. BERECHNUNG DER EMISSION DER SCHADSTOFFKOMPONENTEN FÜR EUROPA-TESTZYKLUS

Die Berechnung des Motorzyklus im Zylinder wird für bestimmte Betriebszustände des Motors durchgeführt und wird mit Motordrehmoment und Motordrehzahl definiert. Um diese Größen zu bestimmen wird von der Fahrwiederstandberechnung begonnen.

Die notwendige Motorleistung wird nach Gleichung (29) berechnet. Aus dieser Motorleistung wird das Motordrehmoment nach Gleichung (3) bestimmt. Die Motordrehzahl wird nach Gleichung (31) definiert.

Das notwendige Motordrehmoment und Motordrehzahl wird hier für den Europa-Testzyklus bestimmt (Bild 5). In der Berechnung werden Angaben vom VW Passat angenommen.

Um das notwendige Motordrehmoment bei entsprechender Motordrehzahl berechnen zu können, muss die Abhängigkeit des Ansaugdrucks von Motordrehmoment definiert werden. Der Ansaugdruck ist nämlich eine der Eingangsgrößen zur Berechnung des Motorzyklus. Durch die Berechnungsanalyse wird die notwendige Abhängigkeit bekommt, die in Bild 6 dargestellt ist. Aufgrund Bild 6 wird die analytische Funktion durch die Gleichungen (32), (33) und (34) definiert.

Die Berechnung der Schadstoffemissionen für den Europa-Testzyklus wird mit Berechnung eines durchschnittlichen Motorzyklus für jede Sekunde des Testzyklus durchgeführt. Das ist zeitsparend angesichts der Tatsache das ein Europa-Testzyklus 195 Sekunden dauert. Diese Berechnung wird für Motor und Katalysator bei Arbeitstemperatur durchgeführt. Die Ergebnisse hängen in hohem Masse vom Luftkraftstoffverhältniss in den einzelnen Betriebspunkten ab. Die angenommenen Werte für das Luftkraftstoffverhältniss während des ganzen Testes sind an Bild 7 dargestellt.

Nach dem beschriebenen Modell ist die gesammte Berechnung durchgeführt worden. Die Ergebnisse der Schadstoffemissionen vor und hinter dem Katalysator sind in Bild 8, 9 und 10 dargestellt.

Nach Vorschrift wird der Europa-Test vier mal durchgeführt. Die gesammte Menge der einzelnen Schadstoffkomponenten wird durch Integrierung der augenblicklichen Werte für einen Fahrzyklus berechnet. Das Ergebnis wird mit vier multipliziert,

$$P = P_k + P_\alpha + P_a + P_t \quad (29)$$

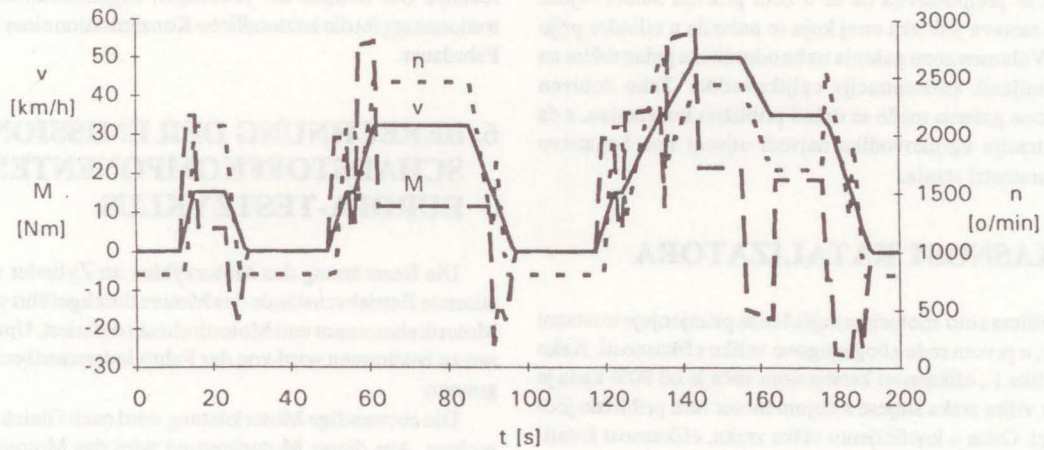
$$M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} \quad (30)$$

$$n = \frac{i_{gp} \cdot i_{mj}}{2 \cdot r_d \cdot \pi} \cdot v \quad (31)$$

$$p_{us} = a + b \cdot M \quad (32)$$

$$a = 0,16745 - 7 \cdot 10^{-6} \cdot n + 3,4 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 \quad (33)$$

$$b = 0,005963 - 5,81 \cdot 10^{-7} \cdot n + 1,121 \cdot 10^{-10} \cdot n^2 \quad (34)$$



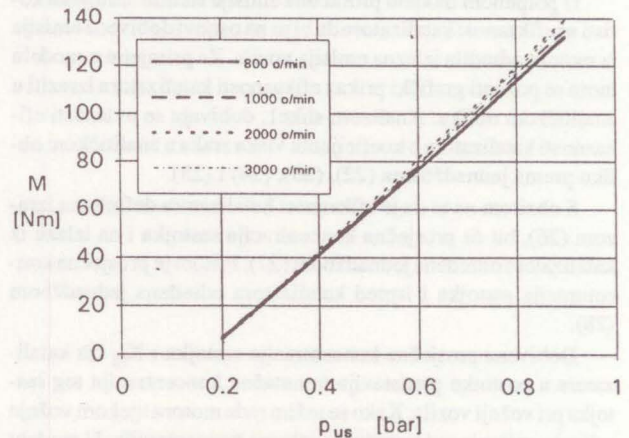
Slika 5. Ovisnost brzine vožnje vozila, brzine vrtnje i okretnog momenta motora o vremenu za Europa-ciklus vožnje
 Bild 5. Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit, Motordrehzahl und Motordrehmoment von Zeit für Europa-Testzyklus

Na osnovi grafičkog prikaza na slici 6. dobiva se analitički izražen potrebni usisni tlak u cilindru motora za traženi okretni moment motora prema jednadžbi (32). Pritom koeficijenti a i b ovise o brzini vrtnje motora n [o/min] kako je to određeno jednadžbama (33) i (34).

U proračunu emisije štetnih sastojaka za Europa-ciklus vožnje polazi se od proračuna jednoga prosječnog ciklusa u cilindru motora za svaku sekundu trajanja ciklusa. To je zbog uštede proračunskog vremena s obzirom na to da jedan Europa-ciklus vožnje traje 195 s. Proračun se provodi za zagrijani motor i katalizator na radnu temperaturu. Dobiveni rezultati jako ovise o koeficijentu viška zraka u pojedinim režimima rada. U ovom radu je pretpostavljen koeficijent viška zraka tijekom Europa-ciklusa kako je to pokazano na slici 7.

Prema opisanom modelu proveden je primjermi proračun emisije štetnih sastojaka u ispušnim plinovima motornog vozila bez katalizatora i s katalizatorom za Europa-ciklus vožnje. Rezultati su pokazani na slikama 8., 9. i 10.

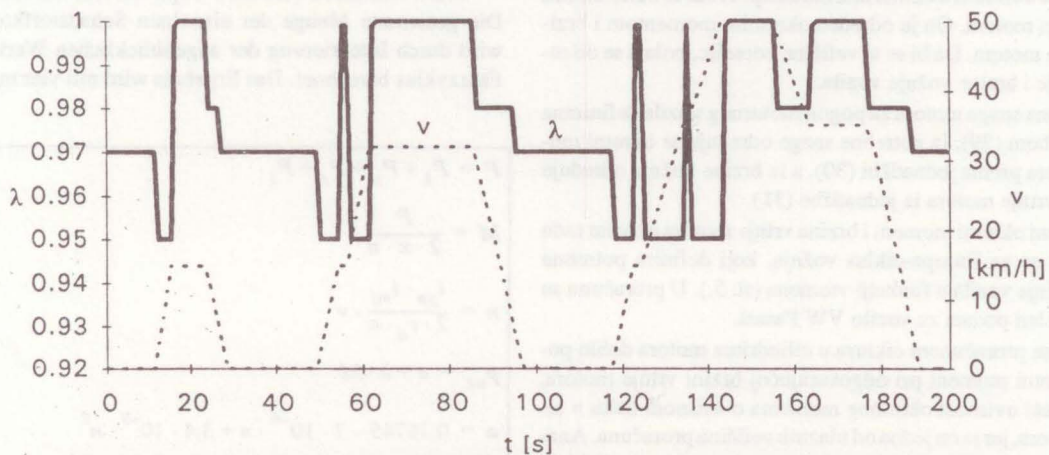
U Europa-testu predviđene su četiri uzastopne vožnje po propisanom ciklusu vožnje. Ispušni plinovi skupljaju se u velike plastične vreće, da bi se nakon završene vožnje napravila analiza i odredile skupne koncentracije pojedinih štetnih sastojaka, odnosno njihova emisija po testu. U ovom modelu integrira se prikazana trenutačna emisija svakoga štetnoga sastojka tijekom jednog cik-



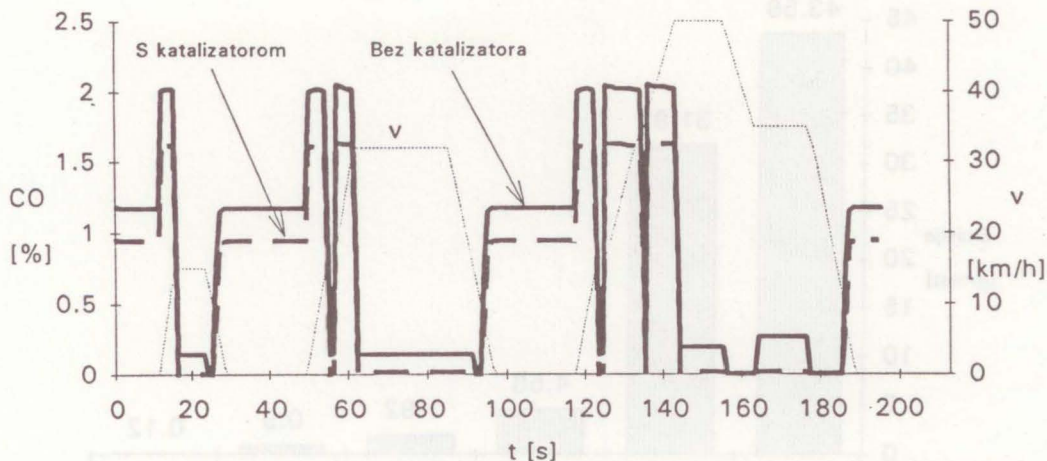
Slika 6. Ovisnost okretnog momenta motora o usisnom tlaku u cilindru motora
 Bild 6: Abhängigkeit des Motordrehmoments vom Ansaugdruck im Motorzylinder

denn es wird vorausgesetzt, dass alle vier Zyklen gleich sind. Die gesammte Emissionen sind an Bild 11 dargestellt.

Da die Emission der Schadstoffkomponenten und der Konvertierungsgrad in hohem Masse vom Luftkraftstoffverhältniss

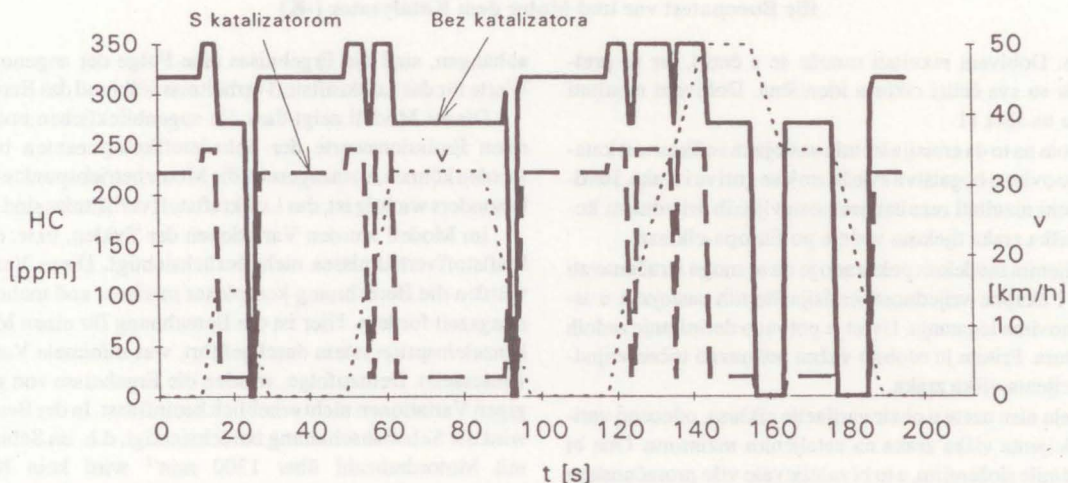


Slika 7. Pretpostavljena ovisnost koeficijenta viška zraka o vremenu za Europa-ciklus vožnje
 Bild 7: Angenommene Abhängigkeit des Luftkraftstoffverhältnisses von Zeit für Europa-Testzyklus



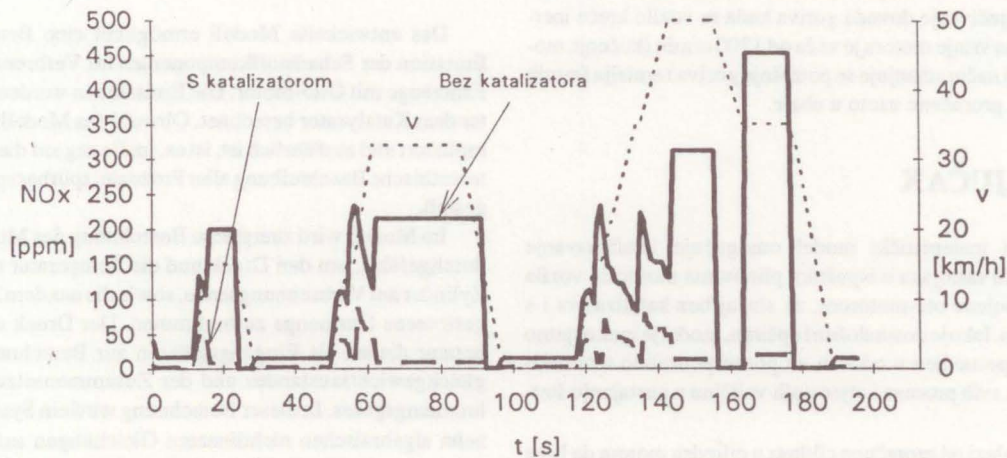
Slika 8. Koncentracija CO u ispušnim plinovima vozila s katalizatorom i bez katalizatora dobivena proračunom za Europa-ciklus vožnje

Bild 8: CO-Konzentration vor und hinter dem Katalysator nach Berechnung für Europa-Testzyklus in Abhängigkeit von Zeit



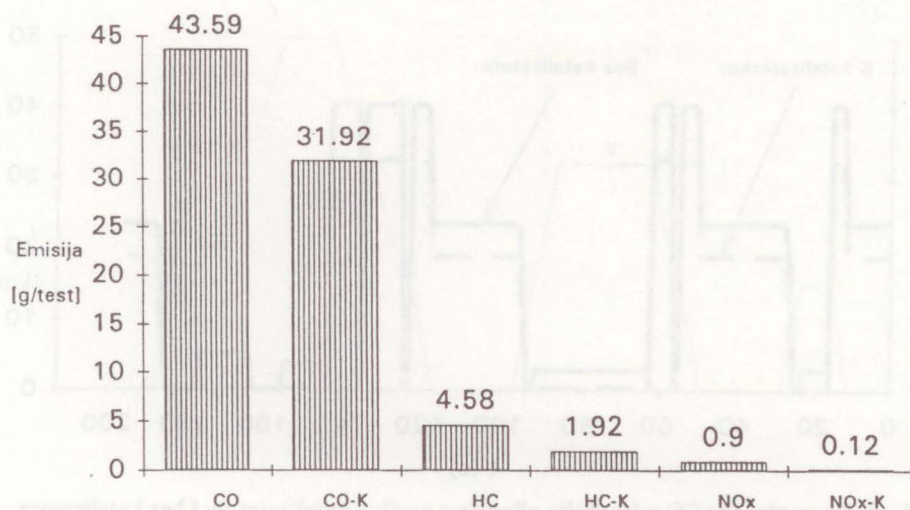
Slika 9. Koncentracija HC u ispušnim plinovima vozila s katalizatorom i bez katalizatora dobivena proračunom za Europa-ciklus vožnje

Bild 9: HC-Konzentration vor und hinter dem Katalysator nach Berechnung für Europa-Testzyklus in Abhängigkeit von Zeit



Slika 10. Koncentracija NO_x u ispušnim plinovima vozila s katalizatorom i bez katalizatora dobivena proračunom za Europa- ciklus vožnje

Bild 10: NO_x-Konzentration vor und hinter dem Katalysator nach Berechnung für Europa-Testzyklus in Abhängigkeit von Zeit



Slika 11. Ukupna emisija štetnih sastojaka za Europa-test dobivena proračunom za slučaj bez katalizatora i s katalizatorom (-K)

Bild 11. Gesamte Emissionen der Schadstoffkomponenten berechneten für Europatest vor und hinter dem Katalysator (-K)

lusa vožnje. Dobiveni rezultati množe se s četiri, jer se pretpostavlja da su sva četiri ciklusa identična. Dobiveni rezultati pokazani su na slici 11.

S obzirom na to da emisija štetnih sastojaka i efikasnost katalizatora jako ovise o bogatstvu svježe smjese goriva i zraka, i ovdje su dobiveni rezultati rezultat pretpostavljenih vrijednosti koeficijenta viška zraka tijekom vožnje po Europa-ciklusu.

Postavljenim modelom pokazano je da se mogu izračunavati trenutačne i ukupne vrijednosti emisija štetnih sastojaka u ispušnim plinovima izgaranja. Uvjet je potpuno definiranje radnih režima motora. Pritom je osobito važno poznavati točne vrijednosti koeficijenta viška zraka.

U modelu nisu uzete u obzir varijacije ciklusa, odnosno varijacije koeficijenta viška zraka na ustaljenim režimima. One bi proračun učinile složenijim, a to bi zahtijevalo više proračunskog vremena. Ovdje je proračun rađen na primjeru motora koji ima uređaj za napajanje gorivom s pojedinačnim ubrizgavanjem goriva, što pretpostavlja da su varijacije ciklusa svedene na najmanju mjeru. Prema tomu, neznatne varijacije ciklusa u proračunu ne bi znatnije utjecale na ukupne rezultate. Promatrani motor ima i uređaj za isključivanje dovoda goriva kada se vozilo kreće inercijom, a brzina vrtnje motora je veća od 1300 o/min (kočenje motorom). Na taj način smanjuje se potrošnja goriva i emisija štetnih tvari. To je u proračunu uzeto u obzir.

7. ZAKLJUČAK

Razvijeni matematički model omogućuje izračunavanje emisije štetnih sastojaka u ispušnim plinovima motornih vozila koja su pogonjena oto-motorom, za slučaj bez katalizatora i s katalizatorom. Iako je dosta složen i opširan, model je ipak osjetno racionalnije postavljen u odnosu na posve podrobno teoretsko obuhvaćanje svih procesa i utjecajnih veličina u nastajanju štetnih tvari.

Model polazi od proračuna ciklusa u cilindru motora da bi se odredili tlak i temperatura radnog medija na kraju procesa izgaranja i količina plinova koji se izbacuju iz cilindra. Određeni tlak i temperatura služe kao ulazne veličine za proračun ravnotežnog

abhangen, sind die Ergebnisse eine Folge der angenommenen Werte für das Luftkraftstoffverhältniss während des Europatests.

Dieses Modell zeigt dass die augenblicklichen und gesamten Emissionswerte der Schadstoffkomponenten berechnet werden können, vorausgesetzt die Motor betriebspunkte und, was besonders wichtig ist, das Luftkraftstoffverhältniss sind bekannt.

Im Modell wurden Variationen der Zyklen, bzw. des Luftkraftstoffverhältnisses nicht berücksichtigt. Diese Variationen würden die Berechnung komplexer machen, und mehr Berechnungszeit fordern. Hier ist die Berechnung für einen Motor mit Einzeleinspritzsystem durchgeführt, was minimale Variationen voraussetzt. Demzufolge, wurden die Ergebnisse von geringfügigen Variationen nicht erheblich beeinflusst. In der Berechnung wird die Schubabschaltung berücksichtigt, d.h. im Schubbetrieb mit Motordrehzahl über 1300 min⁻¹ wird kein Kraftstoff zugeführt, was den Kraftstoffverbrauch und die Schadstoffemission vermindert.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Das entwickelte Modell ermöglicht eine Berechnung der Emission der Schadstoffkomponenten im Verbrennungsgas der Fahrzeuge mit Otto-motor. Die Emissionen werden vor und hinter dem Katalysator berechnet. Obwohl das Modell ziemlich kompliziert und ausführlich ist, ist es, im Bezug auf die vollständige theoretische Beschreibung aller Prozesse, spürbar sparsamer aufgestellt.

Im Modell wird zuerst eine Berechnung des Motorprozesses durchgeführt, um den Druck und die Temperatur des Gases im Zylinder am Verbrennungsende, sowie die aus dem Zylinder ausgestossene Gasmenge zu bestimmen. Der Druck und die Temperatur dienen als Eingangsgrößen zur Berechnung des Gasgleichgewichtszustandes und der Zusammensetzung des Verbrennungsgases. In dieser Berechnung wird ein System von vierzehn algebraischen nichtlinearen Gleichungen aufgestellt. Das Lösen ist sehr empfindlich zum Annahmewerte nicht bekannter Größen und nur die gute zur Konvergenz des Systems führen.

stanja plina, kojim se određuje kemijski sastav plina. U ovom proračunu postavljen je sustav od četrnaest algebarskih nelinearnih jednadžbi. Pri rješavanju sustava treba osobito paziti na pretpostavljanje vrijednosti pojedinih varijabli, jer samo za dobro pretpostavljene vrijednosti sustav konvergira. U protivnom sustav divergira i nije moguće dobiti rješenje.

Iz ravnotežnog stanja plinane dobivaju se neizgorjeli ugljikovodici u plinovima izgaranja. Stoga je postavljen model kojim se koncentracija neizgorjelih ugljikovodika izračunava promatrajući zonu gašenja plamena na stijenka cilindra.

Dobivene koncentracije pojedinih štetnih sastojaka odnose se na izvedbu vozila bez katalizatora, odnosno na izlazu iz motora. Koncentracija pojedinih štetnih sastojaka za vozilo s katalizatorom, odnosno iza katalizatora, dobiva se proračunom na osnovi efikasnosti katalizatora u redukciji i oksidaciji pojedinih sastojaka.

Za proračun trenutne koncentracije pojedinih štetnih sastojaka i njihove emisije tijekom vremena potrebno je definirati radne režime motora. U tu svrhu ovdje je primijenjen Euro-pa-ciklus vožnje.

Dobiveni rezultati u primjernom proračunu vrijede za konkretno vozilo i ugrađeni motor te pretpostavljeno bogatstvo smjese goriva i zraka tijekom vožnje. S obzirom na to da emisija štetnih sastojaka u velikoj mjeri ovisi upravo o koeficijentu viška zraka, kojim se definira bogatstvo smjese goriva i zraka, za točnost dobivenih rezultata od posebne je važnosti točno poznavanje vrijednosti ovoga koeficijenta. On, osim toga, znatno utječe na efikasnost katalizatora, pa pri proračunu emisije štetnih sastojaka iza katalizatora znatno utječe na dobivene rezultate.

LITERATURA

- [1] J. ZAVADA, S. PERŠE: Smanjenje emisije štetnih komponenata ispušnih plinova oto-motora primjenom katalizatora. Zbornik radova Simpozija SEPJ'88, str. 171-174.
- [2] J. ZAVADA: Matematički model određivanja sastava ispušnih plinova Ottovog motora u eksploatacijskim uvjetima. Doktorska disertacija, Zagreb, 1985.

Oznake:

Simbol	Jedinica	Značenje
A_s	[m ²]	površina stijenki radnog prostora
c_p	[J/kgK]	specifična toplina pri konstantnom tlaku
c_v	[J/kgK]	specifična toplina pri konstantnom volumenu
H_d	[J/kg]	donja ogrjevna vrijednost goriva
i	[J/kg]	jedinična entalpija
i_{ss}	[J/kg]	jedinična entalpija svježe smjese
i_{gp}		prijenosni omjer glavnog prijenosnika
i_{mj}		prijenosni omjer mjenjača
K_{ni}	[%]	prosječna koncentracija sastojka i iza katalizatora
K_{pi}	[%]	prosječna koncentracija sastojka i ispred katalizatora
L_o	[kg/kg]	teoretski potrebna količina zraka za izgaranje kilograma goriva
m	[kg]	masa
m_v		značajka izgaranja
M	[Nm]	okretni moment motora
n	[s ⁻¹]	brzina vrtnje motora
N		ukupan broj sastojaka u plinskoj smjesi
p	[Pa]	tlak
p_i	[Pa]	parcijalni tlak sastojka i u plinskoj smjesi
p_{us}	[Pa]	tlak usisa
P_k	[W]	snaga za svladavanje otpora kotrljanja
P_α	[W]	snaga za svladavanje uspona
P_z	[W]	snaga za svladavanje otpora zraka
P_a	[W]	snaga za svladavanje otpora ubrzanja

Zur Bestimmung der Kohlenwasserstoffkonzentration, die durch die Löschung der Flamme an der Brennraumwand entsteht, wird ein zusätzliches Modell festgestellt.

Die errechneten Emissionen sind Rohemissionen. Die Emission hinter Katalysator wurde aufgrund des Konvertierungsgrades des Katalysators berechnet.

Mit dem Modell werden die augenblicklichen Emissionswerte der Schadstoffkomponenten berechnet. Die Bedingung dafür ist ein vollständig definierter Motorbetriebspunkt. Besonders wichtig dabei ist der richtige Wert des Luftkraftstoffverhältnisses. Für die Berechnung der gesamten Schadstoffemissionen nach einer bestimmten Zeit wird ein Fahrzyklus des Europa-Tests angenommen.

Die Ergebnisse der ausgeführten Berechnung gelten für das benannte Fahrzeug und Motor, sowie bei angenommenem Luftkraftstoffverhältniss während der Fahrt. Das Luftkraftstoffverhältniss hat entscheidenden Einfluss auf die Rohemission und den Konvertierungsgrad des Katalysators.

LITERATURHINWEISE

- [1] J. ZAVADA: Verminderung der Schadstoffkomponenten in Verbrennungsgasen des Otto-motors durch Katalysatoranwendung. Symposium SEPJ'88, Zagreb, Sammelband, S. 171-174, 1988.
- [2] J. ZAVADA: Mathematisches Modell zur Bestimmung der Zusammensetzung des Verbrennungsgases des Otto-Motors in Exploata-tionsbedingungen. Dissertation. Zagreb, 1985.

Formelzeichen:

Symbol	Einheit	Bedeutung
A_s	[m ²]	Wandoberfläche des Arbeitsraumes
c_p	[J/kgK]	spezifische Wärme bei konstantem Druck
c_v	[J/kgK]	spezifische Wärme bei konstantem Volumen
H_d	[J/kg]	spezifischer Heizwert
i	[J/kg]	spezifische Enthalpie
i_{ss}	[J/kg]	spezifische Enthalpie des frischen Gemisches
i_{gp}		Achsübersetzung
i_{mj}		Übersetzung des Schaltgetriebes
K_{ni}	[%]	durchschnittliche Konzentration der Komponente i hinter dem Katalysator
K_{pi}	[%]	durchschnittliche Konzentration der Komponente i vor dem Katalysator
L_o	[kg/kg]	stochiometrische Luftmenge
m	[kg]	Masse
m_v		Kennwert des Verbrennungscharakters
M	[Nm]	Motordrehmoment
n	[s ⁻¹]	Motordrehzahl
N		Zahl der Komponenten
p	[Pa]	Druck
p_i	[Pa]	partieller Druck
p_{us}	[Pa]	Ansaugdruck
P_k	[W]	Antriebsleistung zur Überwindung der Rollwiderstände
P_α	[W]	Antriebsleistung zur Überwindung der Steigungswiderstände
P_z	[W]	Antriebsleistung zur Überwindung der Luftwiderstände
P_a	[W]	Antriebsleistung zur Überwindung der Beschleunigungswiderstände
Q	[J]	umtauschte Wärme
r_c		volumenischer Anteil des Kohlenstoff im frischen Gemisch
r_d	[m]	dynamischer Reifenradius
r_i		volumenischer Anteil der Komponente i im Gasgemisch
R	[J/kgK]	Gaskonstante
R_{sm}	[J/kgK]	Gaskonstante des frischen Gemisches
T	[K]	Temperatur
T_{sm}	[K]	Temperatur des frischen Gemisches

Q	[J]	izmijenjena toplina između radnog medija i okoline	μ	[J/kg]	specifična unutrašnja toplina
r_c		volumenski udio ugljika u svježoj smjesi	ν	[m/s]	Fahrgeschwindigkeit
r_d	[m]	dinamički polumjer kotača	V	[m ³]	Volumen
r_i		volumenski udio sastojka i u plinskoj smjesi	V_{zg}	[m ³]	Volumen der Löschzone
R	[J/kgK]	plinska konstanta	x		Vibe-Funktion
R_{sm}	[J/kgK]	plinska konstanta svježih smjesa	x_i		molarer Komponentanteil
T	[K]	apsolutna temperatura	z		Zylinderzahl
T_{sm}	[K]	temperatura svježih smjesa	α	[°]	Winkel der Kurbelwelle
μ	[J/kg]	jedinična unutrašnja energija radnog medija	α_k	[W/m ² K]	Wärmeübergangskoeffizient
ν	[m/s]	brzina vožnje	γ		Faktor der rückständigen Verbrennungsgase
V	[m ³]	volumen	η_i	[%]	Konvertierungsgrad des Katalysators für die Komponente i
V_{zg}	[m ³]	volumen zone gašenja	κ		adiabatischer Exponent
x		funkcija oslobađanja topline	λ		Luftkraftstoffverhältnis
x_i		molni udio sastojka i u plinskoj smjesi	ξ		Koeffizient der Wärmeausnutzung während der Verbrennung
z		broj cilindara	ϕ	[°]	Punktage des Brennverlaufes der Verbrennung
α	[°]	kut koljenastog vratila	ϕ_z	[°]	Verbrennungsdauer
α_k	[W/m ² K]	koeffizijent prijenosa topline			
γ		faktor zaostalih plinova izgaranja			
η_i	[%]	efikasnost katalizatora			
κ		adijabatski eksponent			
λ		faktor zraka			
ξ		koeffizijent iskoristivosti topline pri izgaranju			
ϕ	[°]	kut koljenastog vratila od početka izgaranja			
ϕ_z	[°]	trajanje izgaranja izraženo kutom koljenastog vratila			