

UDK 621.436

# Računalniška analiza delovnega procesa v valju dizelskega motorja s povečanim deležem zaostalih plinov

IVAN PREBIL — RADISLAV PAVLETIČ

## 1. UVOD

Za matematično simuliranje poteka zgorevanja v dizelskih motorjih se dandanes pogosto uporablja Vibejev zapis sproščanja toplote [30] z variabilnima, motorju in njegovemu režimu obratovanja prilagodljivima parametroma:  $m$  — parametrom zgorevanja in  $\varphi_z$  — kotom trajanja zgorevanja. Prilagoditev obeh parametrov terja ugotovitev odvisnosti od veličin, ki definirajo pogoje pri obratovanju motorja: razmernik zraka  $\lambda$ , stanje delovne snovi na vstopu tlak  $p_{sp}$ , temperaturo  $T_{sp}$ , dejanski začetek vbrizgavanja goriva  $\varphi_{vb}$ , vrtilno hitrost motorja  $n_M$  in koeficient zaostalih plinov  $\gamma$ .

Vrsto veličin in parametrov, ki popišejo delovni proces v valju motorja, indicirani tlak, izkoristek, najvišji tlak, temperaturni potek, karakteristiko sproščanja toplote in potek zgorevanja, je mogoče ovrednotiti izključno s termodinamično analizo posnetega indikatorskega diagrama.

V prispevku je podana metoda za pridobitev digitaliziranih preizkusnih vrednosti tlačnega poteka med procesom zgorevanja z uporabo računalnika in matematična metoda za termodinamično analizo visokotlačnega dela indikatorskega diagrama, ki omogoča definiranje dejanske vrednosti za parameter zgorevanja  $m$  in za trajanje zgorevanja  $\varphi_z$ . Stopnja zblizanja znanih vrednosti indikatorskega diagrama in zanesljivost metode pa je preverjena s teoretičnim modelom.

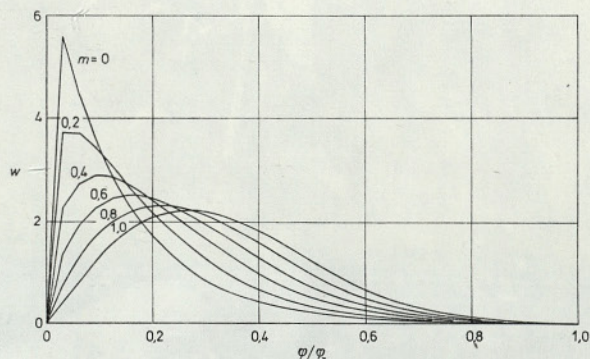
### 1.1. Vpliv sestave delovne snovi na hitrost zgorevanja

Kinetična teorija plinov povezuje hitrost kemične reakcije z verjetnostjo trka reagirajočih molekul [12], [13], [26], [30]. Verjetnost trka molekul različnih reagirajočih snovi je sorazmerna s številom molekul vsake vrste v določenem prostoru oziroma z njihovimi koncentracijami. Hitrost kemične reakcije je definirana kot hitrost časovne spremembe koncentracije izginjajočih ali nastajajočih snovi.

Pri zgorevanju ogljikovodikov se uporabljata gorivo in kisik, zaradi česar se koncentracije začetnih snovi polagoma zmanjšujejo, koncentracije produktov reakcij pa povečujejo. Zvišanje temperature in tlaka pospešuje reakcijske procese, zmanjševanje koncentracije goriva in kisika pa vpliva na zmanjševanje hitrosti kemičnih reakcij.

Hitrost zgorevanja delovne snovi po Vibeju [30] (sl. 1)

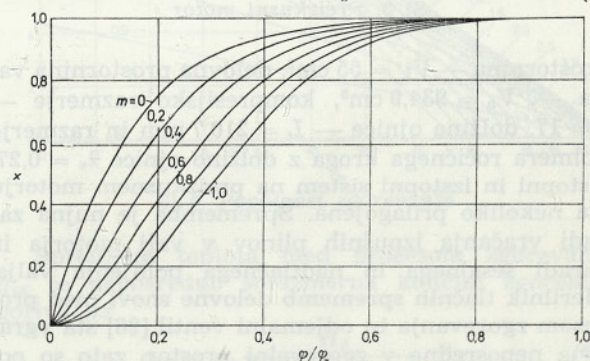
$$w = \frac{dx}{d(\varphi/\varphi_z)} = -a(m+1) (\varphi/\varphi_z)^m e^{a(\varphi/\varphi_z)^{m+1}} \quad (1)$$



Sl. 1. Hitrost porabljanja goriva v odvisnosti od trajanja zgorevanja in parametra zgorevanja  $m$  (računski)

je izražena s hitrostjo porabljanja goriva v odvisnosti od relativnega zasuka ročične gredi  $\varphi/\varphi_z$ . Poraba goriva je prikazana na sliki 2 in jo podaja izraz (2), [14]

$$x = 1 - e^{-a(\varphi/\varphi_z)^{m+1}} \quad (2)$$

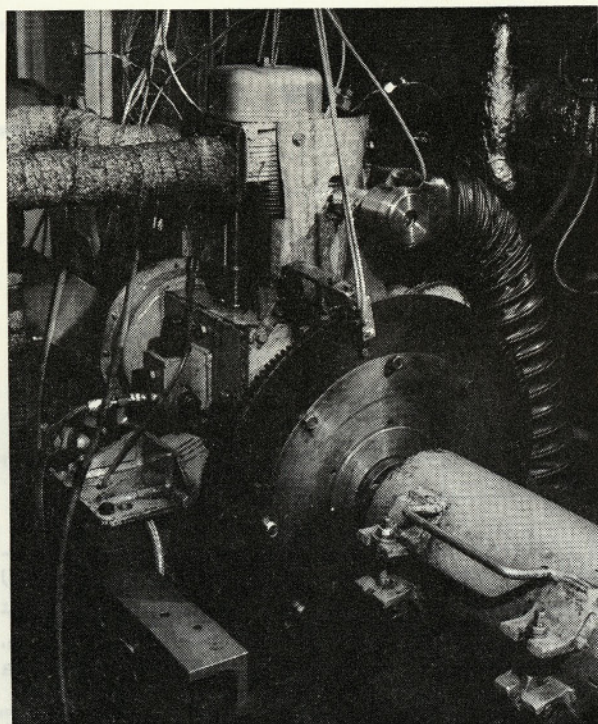


Sl. 2. Poraba goriva v odvisnosti od trajanja zgorevanja in parametra zgorevanja  $m$  (računski)

kjer  $\varphi_z$  pomeni celotno trajanje zgorevanja pri parametru  $m$  kot karakterističnem številu zgorevanja, ki je v tesni povezavi z zamudo vžiga in zajema specifičnosti reakcij (razvejanost reakcijskih verig, spreminjanje verig in prekinitev verig), veličine stanja medijev (tlak, temperatura) ter od njih odvisne fizikalne parametre snovi (prevodnost in koeficient masne difuzije), kinematične razmere medija (hitrost gibanja, turbulentno stanje) in še druge posebnosti. Trajanje zgorevanja pa je povezano s spremembo obremenitve in vrtilne hitrosti motorja. Veličina  $a$  v izrazih (1), (2) je odvisna od kemične pretvorbe goriva.

## 2. IZVEDBA PREIZKUSA

Raziskave so potekale na enovaljnem štiriktaktnem zračno hlajenem dizelskem motorju z neposrednim vbrizgavanjem goriva (sl. 3). Osnovne veličine motorja so premer luknje valja —  $D = 100$  mm, gib bata —  $s = 112$  mm, kompresijska

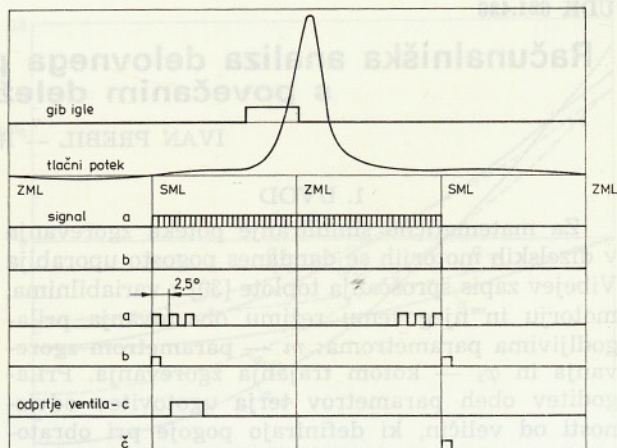


Sl. 3. Preizkusni motor

prostornina —  $V_k = 55 \text{ cm}^3$ , delovna prostornina valja —  $V_a = 934,9 \text{ cm}^3$ , kompresijsko razmerje —  $\varepsilon = 17$ , dolžina ojnice —  $L = 210,7 \text{ mm}$  in razmerje polmera ročičnega kroga z dolžino ojnice  $\lambda_s = 0,27$ . Vstopni in izstopni sistem na preizkusnem motorju sta nekoliko prilagojena. Sprememba je nujna zaradi vračanja izpušnih plinov v valj motorja in zaradi sesalnega in nadtlalnega polnjenja valja. Merilnik tlačnih sprememb delovne snovi med procesom zgorevanja in odjemalni ventil [26] sta vgrajena neposredno v zgorevalni prostor, zato so potrebne spremembe tudi na glavi motorja.

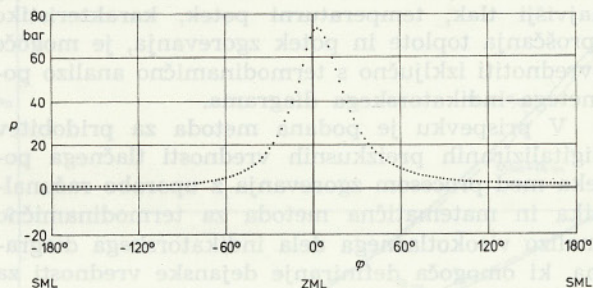
Preizkus, ki omogoča nadzor in zapis veličin v raziskovanih področjih obratovanja motorja med drugimi več ali manj uveljavljenimi meritvami, terja poleg pridobitve zapisa tlačnega poteka in dinamičnega začetka vbrizgavanja goriva v valj ter njunega vrednotenja tudi uvedbo metode za določitev deleža zaostalih plinov [26], [27] v delovni snovi, kar terja posebno opremo, tj. hitri odjemalni ventil in njegovo elektronsko krmiljenje [26], [27], ki zazna krmilne delilne signale samo v visokotlačnem delu indikatorskega diagrama (sl. 4).

Delilni signal a deli visokotlačni del indikatorskega diagrama na intervale  $\Delta\varphi = 2,5^\circ$  zasuka ročične gredi. Signal b zazna spodnjo mrtvo lego bata. Krmiljenje odjemalnega ventila poteka prek signala c, ki je v številni povezavi s signalom a. Krmilne signale je mogoče dobiti prek fototranzistorjev FPT 100 in delilne plošče, pritrjene na vztrajniku motorja (sl. 3). Vrednotenje indiciranega tlačnega



Sl. 4. Krmilni delilni signal

poteka in dinamičnega začetka vbrizgavanja je potekalo posredno prek magnetofonskega zapisa in njegove poznejše digitalizacije in računalniškega vrednotenja na računalniku PDP 11/03 (sl. 5).



Sl. 5. Digitalizirane vrednosti indikatorskega diagrama (preizkus)

Preizkus tako predstavlja kompleksen sistem mehanskih električnih merilnih verig in elektronskih računalniških sistemov krmiljenja in vrednotenja. Med drugimi tudi plinsko kromatografski način ugotavljanja koncentracij posameznih snovi v delovni snovi v valju motorja med komprimiranjem medija. Med preizkusi je koeficient zaostalih plinov za dane pogoje obratovanja motorja definiran iz razmerja  $\text{CO}_{2,\text{sp}}$  v delovni snovi in produktih zgorevanja  $\text{CO}_{2,\text{pz}}$  [4], [15], [16], [26], [27]

$$\gamma = \frac{\text{CO}_{2,\text{sp}}}{\text{CO}_{2,\text{pz}} - \text{CO}_{2,\text{sp}}} \quad (3)$$

in se ujema z definicijo [26], [30] zaostalih plinov, ki jo definira razmerje med maso zaostalih plinov  $m_{zp}$  in maso svežega polnjenja  $m_{sp}$  v valju v območju od 0 do  $\infty$ .

### 3. IZRAČUN KARAKTERISTIKE SPROŠČANJA TOPLOTE IN DOLOČITEV PARAMETRA ZGOREVANJA $m$

#### IN TRAJANJA ZGOREVANJA $\varphi_z$

Izraziti relativno porabo goriva (2) oziroma hitrost zgorevanja (1) v obliki Vibejevega zapisa terja poznavanje trajanja zgorevanja in parametra zgorevanja, ki sta oba v Vibejevem izrazu za porabo goriva v funkciji eksponenta argumenta naravnega

števíla oziroma v izrazu hitrosti zgorevanja kot odvoda izraza porabe goriva glede na trajanje zgorevanja. Dejanski vrednosti velíčin sta definirani na podlagi termodinamične analize med preizkusi posnetega indikatorskega diagrama (sl. 5).

Izhodiščne velíchine za izdelavo računalniškega programa [26], ki uporablja preizkusne rezultate, so konstrukcijski podatki motorja, digitalizirane vrednosti tlakov  $p_i(\varphi_i)$ , preizkusne velíchine, ki definirajo pogoje pri obratovanju motorja; razmernik zraka, stanje delovne snovi na vstopu, vrtilno hitrost motorja, dinamični začetek vbrizgavanja goriva, delež zaostalih plinov, stanje produktov zgorevanja ter kurilno vrednost in elementarno kemično sestavo goriva.

Podlaga za izračun toplote segrevanja  $q_{1-2}$  iz znanega tlačnega poteka v posameznem intervalu zgorevanja je prvi zakon termodinamike [10], [30], [31]

$$q_{1-2} = c_{v1-2}(T_2 - T_1) + \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (4)$$

Absolutno delo se vrednoti po načinu trapezne metode posamezno za vse intervale zgorevanja. Iz goriva dovedena toplota na enoto mase, ki povzroča povečanje notranje energije, je definirana

$$q_{1-2} = \frac{v_{sp}}{\varepsilon} \left( \frac{p_2(\varphi_2) - p_1(\varphi_1)}{\kappa_{1-2} - 1} + \frac{p_1 - p_2}{2} (\psi(\varphi_2) - \psi(\varphi_1)) \right) \quad (5)$$

in je izvedena neposredno iz enačbe (4) [26].

Spremembo sproščanja toplote na enoto mase se vrednoti od začetka zgorevanja pa do kota zavrtitve ročične gredi, pri katerem sproščena toplota doseže največjo vrednost oz. do intervala, pri katerem doseže povečanje sproščene toplote vrednost 0. Časovni potek sproščene toplote čez vse intervale zgorevanja določa enačba

$$q = \sum_{i=1}^n q_{1-2} \quad (6)$$

Relativni delež goriva se med procesom zgorevanja pojavlja kot funkcija med sproščeno toploto  $q$  in kurilno vrednostjo gorljivih snovi v delovnem mediju

$$x_i = \frac{q}{H_u} \quad (7)$$

Kurilna vrednost v procesu sodelujočih gorljivih snovi je odvisna od spodnje kurilne vrednosti vbrizganega goriva in gorljivih komponent v zaostalih plinih.

Največja vrednost relativnega deleža gorljivih snovi se pojavi pri maksimalni sproščeni toploti  $q_{maks}$

$$x_{i maks} = \frac{q_{maks}}{H_u} = \xi \quad (8)$$

in hkrati pomeni vrednost izkoristka zgorevanja

$$\xi = \eta_u \psi \quad (9)$$

Pri tem je toplotni izkoristek  $\psi$  podan

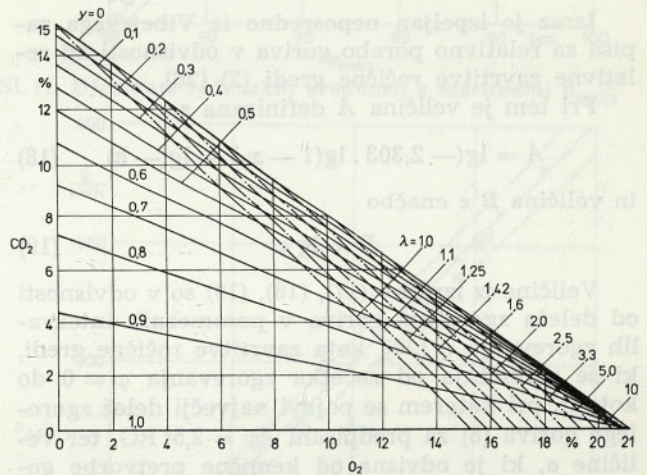
$$\psi = \frac{q_{1-2}}{q_{zg}} \quad (10)$$

Stopnja pretvorbe goriva  $\eta_u$  pa z enačbo [26]

$$\eta_u = \frac{H_u - H_{un}}{H_u} \quad (11)$$

Izgubljena toplota zaradi nepopolnega zgorevanja  $H_{un}$  je definirana na podlagi vrednosti  $CO_2$  in  $O_2$  v izpušnih plinih [26] (sl. 6) in je definirana

$$H_{un} = H_c y c \quad (12)$$



Sl. 6. Popolnost zgorevanja

Sproščena toplota med procesom zgorevanja  $q_{zg}$  je neposredno sorazmerna količini zgorlega goriva  $\Delta x$

$$q_{zg} = \eta_u \frac{H_u}{(1 + \gamma) \lambda Z_0 + 1} \Delta x \quad (13)$$

Za določanje vrednosti razmerja specifičnih toplot in sproščene toplote opazovanega intervala je treba pri prvem približku poznati spremembo molske količine delovne snovi in relativni delež gorljivih snovi iz prejšnjega intervala.

V začetni fazi zgorevanja se izbere vrednost koeficientov za spremembo molske količine  $k_0 = 1$  in za relativni delež gorljivih snovi  $x = 0$ .

Iz indikatorskega diagrama je določljiva hitrost zgorevanja, če se toploti segrevanja  $x_i$  prišteje izgubljena toplota zaradi hlajenja  $x_v$

$$x_e = x_i + x_v \quad (14)$$

Ker je prevzeta domneva [30] linearne zveze med toploto hlajenja in toploto segrevanja, je  $x_v$  podan v naslednji obliki

$$x_v = \left( \frac{1}{\psi} - 1 \right) x_i \quad (15)$$

Izguba toplote zaradi nezgorelega goriva pa je zajeta s faktorjem  $a$  v eksponentu naravnega števila

$$a = \frac{\lg(1 - \eta_u)}{\lg e} \quad (16)$$

Parameter zgorevanja  $m$  se ujema s karakteristiko relativnega deleža v procesu sodelujočega goriva. Dejansko vrednost določimo za dane razmere obratovanja po metodi minimalnih kvadratov.

$$m = \frac{n \sum_{i=1}^n A^2 - \left( \sum_{i=1}^n A \right)^2}{n \sum_{i=1}^n (AB) - \left( \sum_{i=1}^n A \right) \left( \sum_{i=1}^n B \right)} - 1 \quad (17)$$

Izraz je izpeljan neposredno iz Vibejevega zapisa za relativno porabo goriva v odvisnosti od relativne zavrtitve ročične gredi (2) [26].

Pri tem je veličina  $A$  definirana z

$$A = \lg(-2,303 \cdot \lg(1 - x_e) - \lg(-a)) \quad (18)$$

in veličina  $B$  z enačbo

$$B = \lg \varphi \quad (19)$$

Veličine iz izrazov (17), (18), (19) so v odvisnosti od deleža zgorelega goriva v posameznih intervalih zgorevanja  $n$  [26], kota zavrtitve ročične gredi, ki se spreminja od začetka zgorevanja  $\varphi = 0$  do kota  $\varphi$ , pri katerem se pojavi največji delež zgorelega goriva (8) za predpisani  $\Delta\varphi = 2,5^\circ$  RG, ter veličine  $a$ , ki je odvisna od kemične pretvorbe goriva [26].

Trajanje zgorevanja delovne snovi, merjeno s kotom zasuka ročične gredi, določa enačba

$$\varphi_z = 10^C \quad (20)$$

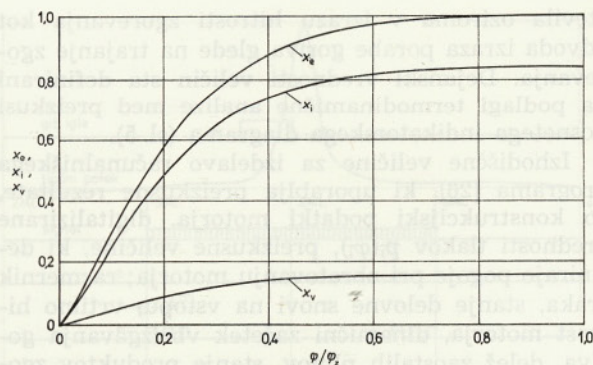
eksponent  $C$  pa popiše izraz

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n B - \frac{1}{m+1} \sum_{i=1}^n A}{n} \quad (21)$$

Eksponent  $C$  je ob veličinah  $A$  in  $B$  odvisen tudi od parametra zgorevanja  $m$  in je izpeljan iz izraza (2) [26].

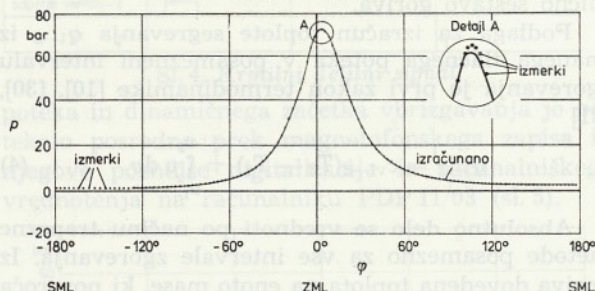
#### 4. REZULTATI ANALIZE

Vrednosti na sliki 7 pomenijo porabo goriva v odvisnosti od trajanja zgorevanja  $\varphi_z$  in parametra zgorevanja  $m$  in so rezultat termodinamične analize indikatorskega diagrama (sl. 8). Merili smo med obratovanjem preizkusnega motorja: vrtilna hitrost motorja —  $n_M = 1750$  vrt./min, razmernik zraka —  $\lambda = 3,26$ , dinamični začetek vbrizgavanja goriva v valj —  $\varphi_{zv} = 20^\circ$  in začetek zgorevanja delovne snovi —  $\varphi_{zz} = 10^\circ$  zavrtitve ročične gredi



Sl. 7. Relativna poraba goriva

$\varphi_z = 80^\circ$ ,  $m = 0,296$ ,  $\lambda = 3,26$ ,  $\gamma = 0,08$ ,  $p_o = 1,2$  bar,  $\xi = 0,8399$



Sl. 8. Prikaz izmerkov in izračunanih vrednosti indikatorskega diagrama

$\lambda = 3,26$ ,  $\gamma = 0,08$ ,  $e = 17$ ,  $m = 0,296$ ,  $\varphi_z = 80^\circ$ ,  $p_o = 1,2$  bar,  $\varphi_{zz} = -10^\circ$

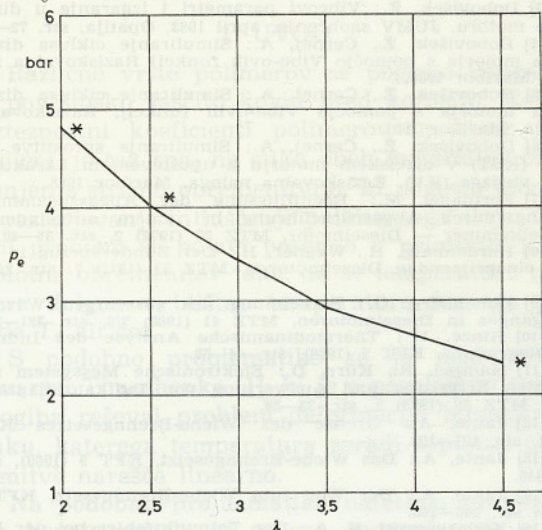
pred zgornjo mrtvo lego bata, spodnja kurilna vrednost goriva —  $H_u = 41,86$  MJ/kg, elementarna kemična sestava goriva —  $C = 0,86$  odstotkov,  $H = 0,13$  odstotkov,  $O = 0,01$  odstotka, stanje delovne snovi pred kompresijo —  $p_{sp} = 1,2 \cdot 10^5$  Pa,  $T_0 = 293$  K, temperatura izpušnih plinov —  $T_{zp} = 720$  K in delež zaostalih plinov —  $\gamma = 8$  odstotkov, temperatura svežega polnjenja —  $T_{sp} = 324,6$  K in pri že omenjenih konstrukcijskih podatkih motorja.

Parameter zgorevanja, ki je definiran s karakteristiko relativnega deleža zgorelega gradiva  $x_e$  pri izkoristku zgorevanja  $x_{i \text{ maks}} = 0,8399 = \xi$  doseže vrednost  $m = 0,296$  pri trajanju zgorevanja  $\varphi_z = 80^\circ$  zavrtitve ročične gredi.

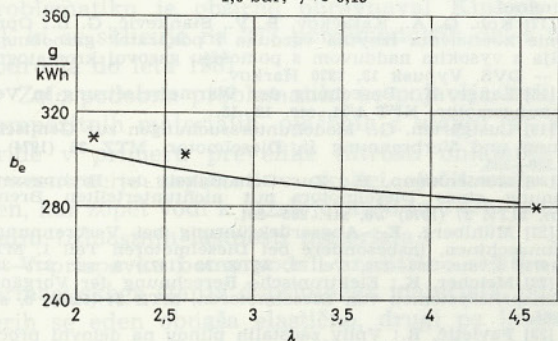
V ta namen je izdelan računalniški program za čisto teoretično definiranje pokazalnikov delovnega procesa, ki upošteva ob izrazih, ki definirajo stanje delovnega medija v posameznih intervalih delovnega procesa [24], [25], [26] (polnjenje, komprimiranje in zgorevanje delovne snovi ter ekspanzijo produktov zgorevanja), tudi spremembo začetka zgorevanja delovne snovi [26], trajanje zgorevanja in parameter zgorevanja. Ob naštetih veličinah je mogoče spreminjati tudi vrednosti, ki definirajo geometrično obliko in prostornino delovnega valja, krmilne čase, kakovost goriva  $H_u$ ,  $C/H$  ter izkoristek zgorevanja.

Primerjava rezultatov pokaže, da se indikatorska diagrama zelo dobro ujemata po celotnem območju zgorevanja. Razlika se pojavlja samo pri najvišji vrednosti tlakov, in sicer dosega izračunani

potek od 1 do  $2 \cdot 10^5$  Pa nižje vrednosti od izmerjenih. To pa kaže tudi na zadovoljivo ujemanje preostalih pokazalnikov delovnega procesa; srednji efektivni tlak  $p_e$  na sliki 9, specifično porabo goriva  $b_e$  na sliki 10 itd.



Sl. 9. Primerjava računskih in izmerjenih vrednosti  $p_e$   
Izračunano:  $\varepsilon = 17$ ,  $\varphi_{zz} = -35^\circ$ ,  $n_M = 1750$  vrt./min,  $p_o = 1,0$  bar,  $\gamma = 0,19$ . Preizkus:  $\varepsilon = 17$ ,  $\varphi_{zz} \approx -35^\circ$ ,  $n_M \approx 1750$  vrt./min,  $p_o = 1,0$  bar,  $\gamma \approx 0,19$

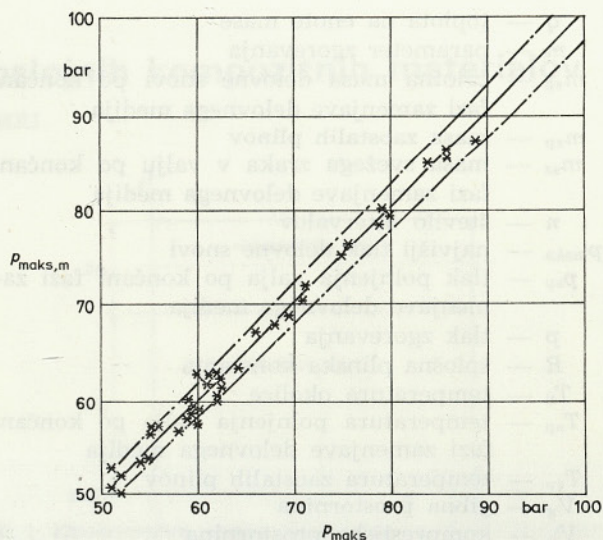


Sl. 10. Primerjava računskih in izmerjenih vrednosti  $b_e$   
Podatki s slike 9.

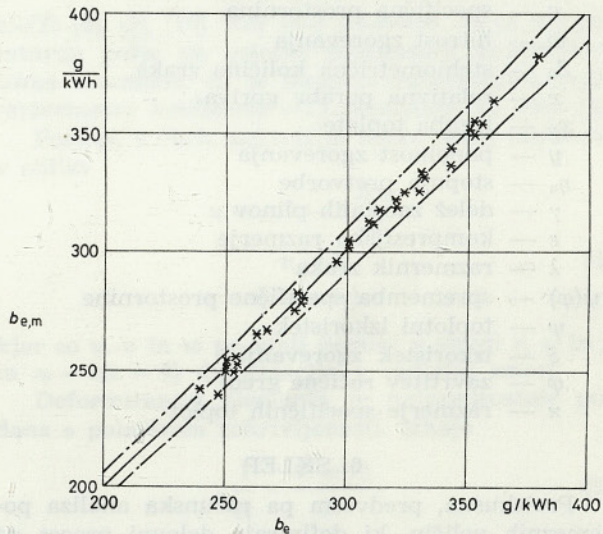
Primerjava rezultatov izračuna in meritev za najvišji tlak delovne snovi med procesom zgorevanja (sl. 11), specifično porabo goriva (sl. 12) in srednji indicirani tlak (sl. 13) glede na idealno 100-odstotno ujemanje pokaže, da se rezultati povečini ujemajo s  $\pm 3$ -odstotno natančnostjo. Čeprav v literaturi [32] nahajamo tudi ugodnejše območje natančnosti ( $\pm 2$  odstotka), lahko trdimo, da so ujemanja zadovoljiva glede na zelo obsežno merilno verigo in zapleten potek preizkušanja. Vrednosti so le za en odstotek zunaj območja natančnosti med preizkusi uporabljenega instrumentarija.

#### 5. OZNAČBE

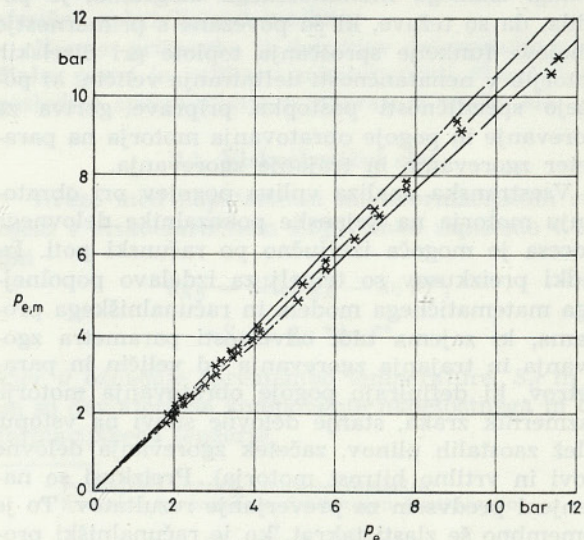
- C — ogljik
- c — specifična toplota
- $H_u$  — spodnja kurilna vrednost goriva
- $H_{un}$  — izgubljena toplota zaradi nepopolnega zgorevanja
- $H_c$  — kurilna vrednost ogljika
- $k_0$  — sprememba molske količine



Sl. 11. Ujemanje računskih vrednosti z meritvami  $p_{maks}$



Sl. 12. Ujemanje računskih vrednosti z meritvami  $b_e$



Sl. 13. Ujemanje računskih vrednosti z meritvami  $p_e$

## LITERATURA

- $q$  — toplota na enoto mase  
 $m$  — parameter zgorevanja  
 $m_{sp}$  — celotna masa delovne snovi po končani fazi zamenjave delovnega medija  
 $m_{zp}$  — masa zaostalih plinov  
 $m_{sz}$  — masa svežega zraka v valju po končani fazi zamenjave delovnega medija  
 $n$  — število intervalov  
 $p_{maks}$  — najvišji tlak delovne snovi  
 $p_{sp}$  — tlak polnjenja valja po končani fazi zamenjave delovnega medija  
 $p$  — tlak zgorevanja  
 $R$  — splošna plinska konstanta  
 $T_0$  — temperatura okolice  
 $T_{sp}$  — temperatura polnjenja valja po končani fazi zamenjave delovnega medija  
 $T_{zp}$  — temperatura zaostalih plinov  
 $V_g$  — gibna prostornina  
 $V_k$  — kompresijska prostornina  
 $V_{sp}$  — prostornina svežega polnjenja  
 $v$  — specifična prostornina  
 $w$  — hitrost zgorevanja  
 $Z_0$  — stehiometrična količina zraka  
 $x$  — relativna poraba goriva  
 $x_v$  — izguba toplote  
 $y$  — popolnost zgorevanja  
 $\eta_u$  — stopnja pretvorbe  
 $\gamma$  — delež zaostalih plinov  
 $\varepsilon$  — kompresijsko razmerje  
 $\lambda$  — razmernik zraka  
 $\psi(\varphi)$  — sprememba specifične prostornine  
 $\varphi$  — toplotni izkoristek  
 $\xi$  — izkoristek zgorevanja  
 $\varphi$  — zavrtevec ročične gredi  
 $\kappa$  — razmerje specifičnih toplot

## 6. SKLEP

Preizkusna, predvsem pa računski analiza posameznih veličin, ki definirajo delovni proces na podlagi znanega indikatorskega diagrama, je potrdila, da so težave, ki so povezane s primernostjo Vibejeve funkcije sproščanja toplote pri dizelskih motorjih v nenatančnosti definiranja veličin, ki opišejo specifičnosti postopka priprave goriva za zgorevanje in pogoje obratovanja motorja na parameter zgorevanja in trajanje zgorevanja.

Vsestranska analiza vpliva pogojev pri obratovanju motorja na dejanske pokazalnike delovnega procesa je mogoča izključno po računski poti. Izsledki preizkusov so temelj za izdelavo popolnejšega matematičnega modela in računalniškega programa, ki zajema tudi odvisnosti parametra zgorevanja in trajanja zgorevanja od veličin in parametrov, ki definirajo pogoje obratovanja motorja (razmernik zraka, stanje delovne snovi na vstopu, delež zaostalih plinov, začetek zgorevanja delovne snovi in vrtilno hitrost motorja). Preizkusi so namenjeni predvsem za preverjanje rezultatov. To je pomembno še zlasti takrat, ko je računalniški program razvit samostojno.

- [1] Ackermann, G.: Das Verbrennungsdreieck bei Russbildung, Forschungs-Heft 366, str. 1—7.
- [2] Beniek, E., Woschni, G.: Rechnerische Untersuchung des Betriebsverhaltens ein- und zweistufig aufgeladener mittelschnellauffender Viertakt Dieselmotoren, MTZ 39 (1978) 3, str. 93—98.
- [3] Dobovišek, Z.: Vibeovi parametri i izgaranje u dizelskom motoru, JUMV saobćenja, april 1983, Opatija, str. 72—73.
- [4] Dobovišek, Z., Černež, A.: Simuliranje ciklusa dizelskega motorja s pomočjo Vibe-ovih funkcij Raziskovalna naloga, Maribor 1980.
- [5] Dobovišek, Z., Černež, A.: Simuliranje ciklusa dizelskega motorja s pomočjo Vibe-ovih funkcij, Raziskovalna naloga, Maribor 1981.
- [6] Dobovišek, Z., Černež, A.: Simuliranje sprostitve toplote (KST) v dizelskem motorju z upoštevanjem karakteristike vbrizga (KV), Raziskovalna naloga, Maribor 1983.
- [7] Fornagel, M.: Beeinflussung der Abgaszusammensetzung durch Abgasrückführung bei einem aufgeladenen Wirbelkammer — Dieselmotor, MTZ 33 (1972) 2, str. 35—40.
- [8] Hardenberg, H., Wagner, H.: Der Zünderverzug in direkt einspritzenden Dieselmotoren, MTZ 32 (1971) 7, str. 240—248.
- [9] Hohenberg, G.: Berechnung des gassetigen Wärmeüberganges in Dieselmotoren, MTZ 41 (1980) 7/8, str. 321—326.
- [10] Hinze, W.: Thermodynamische Analyse des Indikator-Diagramms, KFT 2 (1968), str. 44—50.
- [11] Hampel, R., Kurr, D.: Elektronische Messsystem zur digitalen Erfassung und Auswertung von Indikator-Diagrammen, MTZ 36 (1975) 2, str. 33—38.
- [12] Jante, A.: Grenze des Wiebe-Brenngesetzes KFT 5/1961, str. 191—192.
- [13] Jante, A.: Das Wiebe-Brenngesetz, KFT 9 (1960), str. 340—346.
- [14] Jante, A.: Der Weg zum Wiebe-Brenngesetz, KFT 4 (1961), str. 140—143.
- [15] Kodranowski, H. A.: Der Totpunktfehler bei der Bestimmung des indizierten Mitteldrucks von Verbrennungsmotoren, MTZ (1976), 1/2, str. 19—23.
- [16] Kedrin, O. G.: Opredelenie izbytki vozduha dlja sgorinja v dizeljah. Dvigateli vnutrennego sgoranja, 1965, Leningrad.
- [17] Koh, G. A., Kazačkov, R. V., Stankevič, G. L.: Opredelenie koeficienta izbytki vozduha i pokazatel' gazoobmena dizelja s vysokim nadduvom s pomoščjo gazovoj kromatografije — DVS, Vypusk 12, 1970 Harkov.
- [18] Lange, K.: Berechnung der Wärmefreisetzung in Verbrennungsmotor, KFT 1/74, str. 12—15.
- [19] Lustgarten, G.: Modelluntersuchungen zur Gemischbildung und Verbrennung in Dieselmotor, MTZ 35 (1974) 9, str. 320—325.
- [20] Möhlenkamp, H.: Zur Genauigkeit der Brenngesetzrechnung eines Dieselmotors mit nichtunterteilten Brennraum, MTZ 37 (1976) 7/8, str. 285—291.
- [21] Mühlberg, E.: Abgasrückführung bei Verbrennungskraftmaschinen, insbesondere bei Dieselmotoren Teil 1, MTZ 32 (1971) 5, str. 166—172, Teil 2, MTZ 32 (1971) 9, str. 327—334.
- [22] Melcher, K.: Elektronische Berechnung der Vorgänge in Einspritzsystemen von Dieselmotoren, MTZ 24 (1963), 8, str. 27—285.
- [23] Pavletič, R.: Vpliv zaostalih plinov na delovni proces in emisijo motorjev z notranjim izgorevanjem, SV (1974) 4, str. 151—160.
- [24] Pavletič, R., Prebil, I.: Vpliv zaostalih plinov na proces dizelskih motorjev, LP, 1. del, Ljubljana, 1981.
- [25] Pavletič, R., Prebil, I.: Vpliv zaostalih plinov na proces dizelskih motorjev, LP, 2. del, Ljubljana, 1981.
- [26] Prebil, I.: Vpliv zaostalih plinov na proces v valju dizelskega motorja, Disertacija, Ljubljana, 1985.
- [27] Prebil, I., Pavletič, R., Mužič, P.: Određivanje količine zaostalih gasova u cilindru dizel motora, JUMV saobćenja (x) 56/57, Kragujevac, 1984.
- [28] Sitkei, G.: Über den dieselmotorischen Zündverzug, MTZ 24 (1964) 6, str. 190—194.
- [29] Turns, S. R., Borman, G. L.: Internal Combustion Engine Sampling Probes: An Eksperimental Study of Sample-Gaz Origins and Flow Disturbances, Combustion and Flame 38 (1980), str. 313—327.
- [30] Vibe, I. I.: Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren, VEB Verlag Technik, Berlin (1970).
- [31] Vibe, I. I., Farator, M. F.: Elektronische Analyse der Arbeitsspiele von Verbrennungsmotoren, Forschung und Entwicklung (1965).
- [32] Woschni, G.: Elektronische Berechnung von Verbrennungsmotor-Kreisprozessen, MTZ 26/11, str. 439—446.
- [33] Woschni, G.: Die Berechnung der Wandverluste und der termischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren, MTZ 31 (1970) 12, str. 491—499.
- [34] Yoshida, M., Ypma, M.: Anwendung eines elektronisch gesteuerten Gasentnahmesystems an einem aufgeladenem MVM-Dieselmotor, MTZ 40 (1979) 7/8, str. 319—323.

Naslov avtorjev: dr. Ivan Prebil, dipl. inž.,  
 prof. dr. Radislav Pavletič, dipl. inž.,  
 Fakulteta za strojništvo, Murnikova 2