

UDK 621.43.03:621.436

Vpliv obratovalnih razmer motorja na trajanje in obliko zgorevanja

IVAN PREBIL — RADISLAV PAVLETIČ

1.0. UVOD

Vibejev zapis sproščanja toplote je pogosto uporabljen za prikazovanje poteka zgorevanja v motorjih z notranjim zgorevanjem pri reševanju različnih problemov, kakršni so: preračun tlačnega poteka v analizi mehanskih in toplotnih obremenitev, določanje indiciranih kazalnikov delovnega procesa, izbira kota začetka in trajanja vbrizgavanja goriva, definiranje vstopnega in izstopnega sistema, namestitve in izbira turbopuhala, študij in analiza toksičnih komponent v izpušnih plinih ter še vrsto drugih problemov, ki se navadno rešujejo s preizkusi.

Vibejev izraz [18] v integralni in diferencialni obliki ima dva značilna parametra: parameter zgorevanja m in trajanje zgorevanja φ_z . Prilagoditev izrazov vrsti in posebnostim motorja ter njegovemu obratovalnemu stanju terja poznavanje odvisnosti obeh parametrov od značilnih veličin, ki definirajo obratovanje motorja. V literaturi so dobro obdelane njune odvisnosti od razmernika zraka λ , vrtilne hitrosti n , dejanskega začetka vbrizgavanja goriva φ_{vb} , stanja delovne snovi na vstopu v valj predvsem v razmerah sesalnega delovanja motorja T_{sp} , p_{sp} , medtem ko so vplivi povečanega vstopnega tlaka pri nadtlacnem polnjenju in vpliv zaostalih plinov γ na m in φ_z manj obdelani in v delu [11] dopolnjeni, ob tem pa tudi prvi preverjeni s preizkusi. Izrazi so bili postavljeni s preizkušanjem v določenih obratovalnih režimih enovaljnega dizelskega motorja z $D/S = 100/112$ z neposrednim vbrizgavanjem v vdolbino v batu in s kompresijskim razmerjem 1:17. Na podlagi poskusnih rezultatov so bili postavljeni analitični izrazi in z računalnikom izračunani za široko področje obratovalnega polja motorja, tako glede na vrtilno hitrost motorja, razmernik zraka, tlak in temperaturo vstopnega zraka kakor tudi glede na delež zaostalih plinov v delovni snovi. V posameznih obratovalnih točkah so bili izračuni ponovno preverjeni s preizkusi. Pokazalo se je zelo dobro ujemanje. Veljavnost Vibejevega zapisa sproščanja toplote, postavljenih analitičnih izrazov za njegove parametre in uporabnost računalniškega programa je bila s tem potrjena.

2.0. ZAČETEK ZGOREVANJA DELOVNE SNOVI

Zgorevanje delovne snovi se začne po določeni zakasnitvi. To je vsota zamude vbrizganega goriva in zamude vžiga delovne snovi. Statičen začetek

vbrizgavanja goriva v valj φ'_{zvb0} je spremenljiv s poprejšnjo nastavitvijo vbrizgalnega sistema [11]. Zamuda vbrizgavanja goriva se nanaša pri določenem brizgalnem sistemu na spremembo vrtilne hitrosti motorja [11].

$$\varphi_{zvb} = \varphi'_{zvb0} \cdot \frac{n}{n_0} \quad (1)$$

Referenčni kot zavrtitve ročične gredi, pri katerem se začne vbrizgavanje goriva $\varphi'_{zvb0} = 7,5^\circ$, je določen z opazovanjem igle v brizgalni šobi [11].

Zamuda vžiga delovne snovi, gledano v odvisnosti od časa, je podana z enačbo [14]:

$$\tau_{zv} = \left(0,5 + 0,135 e^{\frac{32,66 \cdot 10^6}{RT_{vb}}} p_{vb}^{-0,7} + e^{\frac{32,66 \cdot 10^6}{RT_{vb}}} \cdot p_{vb}^{-1,8} \cdot 4,8 \right) \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

ki zajema fizikalno in kemično pripravo vbrizganega goriva za vžig. Vrednosti p_{vb} in T_{vb} pomenita srednji veličini tlaka in temperature delovne snovi v valju motorja med zamudo vžiga. Enačba (2) daje izmed vseh izrazov [2] vrednosti, ki se dobro ujemajo s preizkusnimi kakor tudi v usmeritvi teh vrednosti. Referenčno zamudo, v kateri je zajeta referenčna vrtilna hitrost motorja, podaja izraz

$$\varphi_{zv0} = 6\tau_{zv} n_0 \quad (3)$$

Veličina n_0 v izrazu (1) in (3) pomeni preizkusno referenčno vrtilno hitrost motorja (1330 vrt./min) [11]. Zamuda vžiga se nanaša tudi na spremembo vrtilne hitrosti n

$$\varphi_{zv} = 6\tau_{zv} n \quad (4)$$

Z združitvijo obeh vrednosti je podan začetek zgorevanja delovne snovi za vsako obratovalno točko motorja [11]

$$\varphi_{zz} = \varphi_{zvb0} + \varphi_{zvb} + \varphi_{zv} \quad (5)$$

3.0. ODVISNOST DOLŽINE ZGOREVANJA IN PARAMETRA ZGOREVANJA OD OBRATOVALNIH RAZMER V MOTORJU

Pri izračunu poteka zgorevanja je nujno treba poznati hitrost porabljanja goriva v odvisnosti od kota zavrtitve ročične gredi [2], [11], [17]

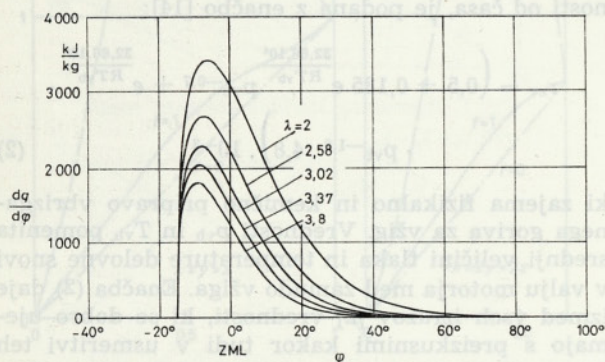
$$w = \frac{dx}{d\left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)} = 6,908 (m+1) \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right) e^{-6,908(\varphi/\varphi_z)^{(m+1)}} \quad (6)$$

ki je temelj za definiranje hitrosti sproščanja toplote med procesom zgorevanja. Raziskave so pokazale, da potek zgorevanja ni enopomensko odvisen od razmernika zraka λ , začetka zgorevanja φ_{zz} , trajanja zgorevanja φ_z , parametra zgorevanja m [2], [3], [11], [18] in deleža zaostalih plinov γ [11].

Matematičen zapis odvisnosti veličin zgorevanja m in φ_z od razmer pri obratovanju dizelskega motorja z neposrednim vbrizgavanjem goriva terja preizkusne referenčne vrednosti posameznih veličin in eksponentov [11].

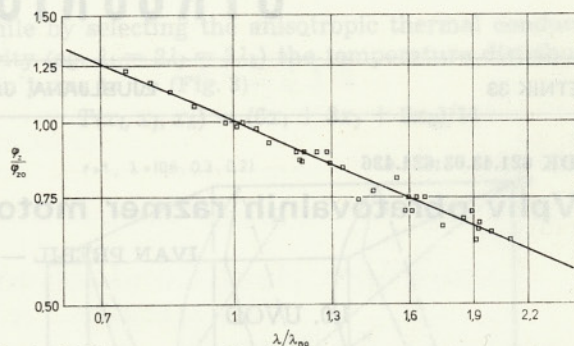
3.1. Razmernik zraka (obremenitev motorja)

Vpliv razmernika zraka na izračunane poteke zgorevanja prikazuje slika 1. Moč motorja, pri konstantnem stanju medija na vstopu in nespremenjeni vrtilni hitrosti, se spreminja z različno količino v valj vbrizganega goriva.



Sl. 1. Poteki zgorevanja pri spremenljivi obremenitvi (preizkus) $n = 1500$ vrt./min, $\varphi_{vz} = -30^\circ$, $p_{sp} = 1,2 \cdot 10^5$ Pa, $\lambda = 0,03$

Raziskave [7], [8] kažejo, da se vbrizgavanje goriva začne vedno pri istem kotu zasuka ročične gredi, to potrjuje tudi opazovanje igle v brizgalni šobi [11] in velja za stalno enako vrtilno hitrost motorja. Pri naraščajoči obremenitvi motorja se spremeni samo potek vbrizgavanja, povečuje se trajanje vbrizgavanja in količina vbrizganega goriva [11]. Zaradi nespremenjenega stanja delovne snovi v valju motorja na začetku vbrizgavanja goriva T_{vb} , p_{vb} , ostaneta zamuda vžiga in začetek zgorevanja nespremenjena. Trajanje zgorevanja pa se spremeni pri povečani obremenitvi motorja zaradi povečane količine vbrizganega goriva (sl. 1), daljšega poteka vbrizgavanja in nižje koncentracije razpoložljivega kisika v valju proti koncu zgorevanja delovne snovi. Vrednosti na sliki 2 pomenijo relativno trajanje zgorevanja pri stalno enaki vrtilni hitrosti motorja. V diagramu z dvojno logaritemsko skalo se vrednosti razvrstijo po premici z naklonskim koeficientom $-0,62$.



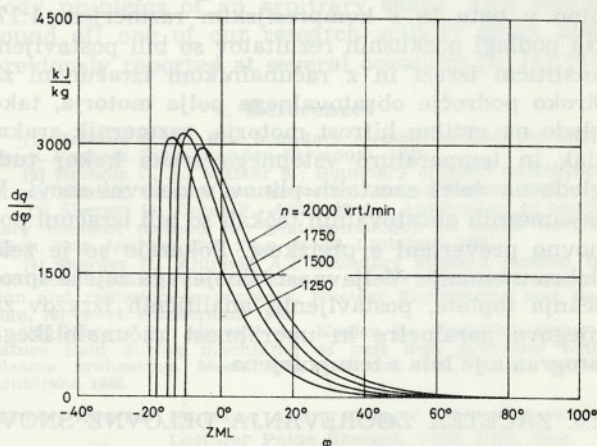
Sl. 2. Vpliv razmernika zraka na trajanje zgorevanja delovne snovi (preizkus)
 $\varphi_z/\varphi_{z0} = (\lambda/\lambda_{n0})^{-0,62}$

Trajanje zgorevanja ni bilo določeno s potekom zgorevanja delovne snovi, ampak iz funkcije poteka zgorevanja (x_0) [11] in se ujema z integralno vrednostjo poteka zgorevanja v odvisnosti od relativnega kota zasuka ročične gredi. Absolutne vrednosti za trajanje zgorevanja pri različnih obremenitvah imajo podobno usmeritev kakor prikazana relativna trajanja zgorevanja delovne snovi pri enaki preizkusni referenčni vrednosti razmernika zraka $\lambda_0 = 2,0$ [11] in preizkusnem referenčnem kotu $\varphi_{z0} = 85^\circ$ [11] zasuka ročične gredi. Tako lahko primerjamo vse izmerjene vrednosti z regresijsko premico

$$\frac{\varphi_z}{\varphi_{z0}} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{-0,62} \quad (7)$$

3.2. Vrtilna hitrost motorja

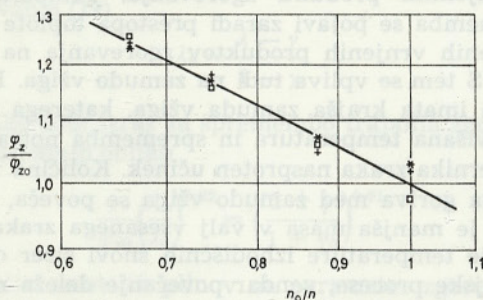
Pri spremembi vrtilne hitrosti motorja je težko natančno definirati začetek, intenzivnost in trajanje vbrizgavanja in zgorevanja ter ugotoviti njihov vpliv na potek nastajanja delovne snovi. Zaradi preprostejše ponazoritve so poteke zgorevanja prikazani v odvisnosti od kota zasuka ročične gredi (sl. 3). Statičen začetek dotoka goriva se pojavi v vseh primerih pri stalno enakem kotu zasuka ročične gredi [11]. Z večanjem vrtilne hitrosti motorja se poveča hitrost bata visokotlačne tlačilke in tlak



Sl. 3. Poteki zgorevanja pri spremenjeni vrtilni hitrosti motorja (preizkus) $\lambda = 3,08$, $\gamma = 0,03$, $p_{sp} = 1,2 \cdot 10^5$ Pa, $\varphi_{zv} = -20^\circ$ RG

vbrizganega goriva, izboljša se razpršitev goriva, vbrizgavanje goriva je intenzivnejše in krajše. Pojavljajo pa se razlike pri zamudi vbrizgavanja in trajanju vbrizgavanja goriva. Zato je stanje delovne snovi v trenutku vbrizga goriva (T_{vb} , p_{vb}) spremenjeno, kar vpliva tudi na zamudo vžiga, ki pa se v tem primeru gledano po času le minimalno spreminja (2). Vzrok je slaba priprava delovne snovi pri manjši vrtilni hitrosti motorja, manj ugodna pa je tudi razpršitev goriva in turbulenca v zgorevalnem prostoru. Nasprotna nagnjenja je opaziti pri poteku vbrizgavanja in zgorevanja, ki sta pri manjši vrtilni hitrosti motorja, gledano nad kotom zasuka ročične gredi, krajša. Prav tako tudi zamuda vžiga in trajanje zgorevanja. Očitno je, da se pri večji vrtilni hitrosti motorja krajši razpoložljivi čas ne izravna v popolnosti z boljšo pripravo delovne snovi. Sprememba vrtilne hitrosti ne vpliva samo na konico, ampak tudi na obliko in trajanje zgorevanja.

Vrednosti φ_z/φ_{z0} v odvisnosti od n_0/n so razvidne s slike 4. Enaki simboli pomenijo relativno trajanje pri spreminjanju se vrtilni hitrosti motorja, stalno enakem razmerniku zraka in deležu zaostalih plinov.

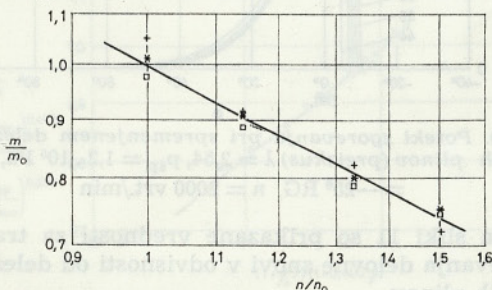


Sl. 4. Vpliv vrtilne hitrosti motorja na trajanje zgorevanja delovne snovi (preizkus)
 $\varphi_z/\varphi_{z0} = (n_0/n)^{-0,525}$

Vrednosti se razvrstijo v diagramu z dvojno logaritemsko skalo po premici z naklonskim koeficientom $-0,525$

$$\frac{\varphi_z}{\varphi_{z0}} = \left(\frac{n_0}{n}\right)^{-0,525} \quad (8)$$

Razvidno je, da ima sprememba vrtilne hitrosti večji vpliv na trajanje zgorevanja, kar delno vpliva tudi na obliko zgorevanja, manj pa na parameter zgorevanja.



Sl. 5. Vpliv vrtilne hitrosti motorja na parameter zgorevanja (preizkus)
 $m/m_0 = (n/n_0)^{-0,725}$

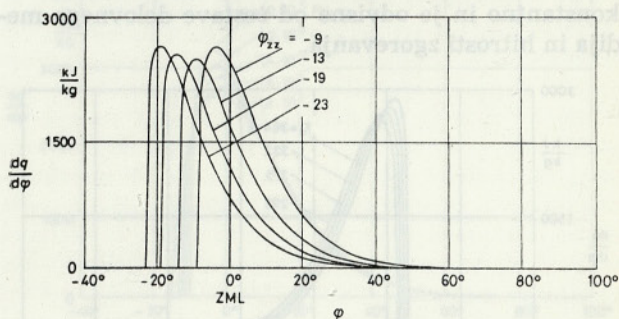
Definirana je sprememba parametra zgorevanja v odvisnosti n/n_0 (sl. 5). Vrednosti v diagramu z dvojno logaritemsko skalo popiše premica z naklonskim koeficientom $-0,725$

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-0,725} \quad (9)$$

Preizkusna referenčna vrednost za parameter zgorevanja je $m_0 = 0,3$ [11]. Za vrtilno hitrost n_0 pa je enaka kakor v izrazu (1) in (3).

3.3. Začetek vbrizgavanja goriva v valj

Pri spreminjanju se začetku vbrizgavanja goriva v valj in stalno enakih veličinah obratovanja motorja: razmerniku zraka, deležu zaostalih plinov, vrtilni hitrosti motorja in tlaku delovne snovi na vstopu, se poteka vbrizgavanja in zgorevanja praktično samo prestavita, ni pa opazna razlika pri trajanju in obliki (sl. 6). Potek zgorevanja se sicer pomakne proti zgornji mrtvi legi bata, kot premaknitve pa se spreminja odvisno od začetka vbrizgavanja goriva v valj in od zamude vžiga (5). Zamuda vžiga je odvisna od stanja na kompresijski krivulji T_{vb} , p_{vb} , (2), (4). S kasnejšim vbrizgavanjem goriva v valj se količina med zamudo vžiga vbrizganega goriva zmanjšuje, to je opaziti pri nižji intenzivnosti začetka in kasnejšem razvoju zgorevanja, količina delovne snovi pa ostane nespremenjena. Nespremenjeno ostane tudi trajanje zgorevanja.

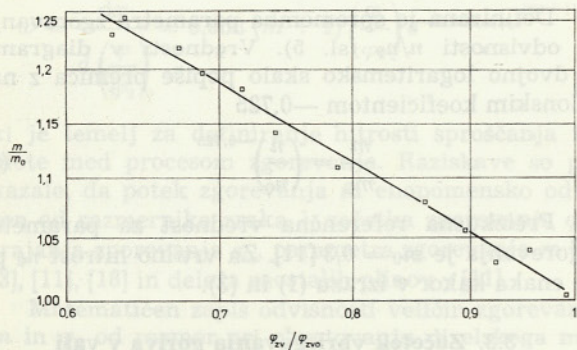


Sl. 6. Poteki zgorevanja pri različnih kotih vbrizgavanja goriva (preizkus) $\lambda = 2,87$, $p_{sp} = 1,0 \cdot 10^5$ Pa, $n = 1330$ vrt./min, $\gamma = 0,03$

Izhodišče vrednosti za parameter zgorevanja m/m_0 v odvisnosti od spremembe zamude vžiga prikazuje slika 7. Vrednosti so v diagramu z dvojno logaritemsko skalo na premici z naklonskim koeficientom $-0,492$. To pa pomeni, da se parameter zgorevanja spreminja približno s korenem zamude vžiga delovne snovi

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{\varphi_{zv}}{\varphi_{zv0}}\right)^{-0,492} \quad (10)$$

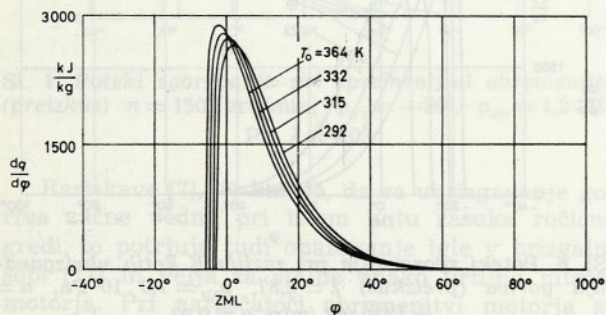
Preizkusna referenčna vrednost za zamudo vžiga ($\varphi_{zv0} = 7,5^\circ$) [11], zasuka ročične gredi je določena z izrazom (3) pri referenčni vrtilni hitrosti motorja (n_0).



Sl. 7. Vpliv začetka vbrizgavanja goriva na parameter zgorevanja (preizkus)
 $m/m_0 = (\varphi_{zv}/\varphi_{zvo})^{-0,492}$

3.4. Temperatura delovne snovi na vstopu

Vpliv spremembe vstopne temperature delovnega medija pri konstantnih veličinah obratovanja motorja, tj. razmerniku zraka, deležu zaostalih plinov, vrtilni hitrosti motorja, začetku vbrizgavanja goriva v valj in tlaku delovne snovi na vstopu, prikazuje slika 8. S spreminjanjem vstopne temperature se vpliva le na količino medija v valju motorja in začetek zgorevanja. Višja ko je temperatura delovne snovi, krajša je zamuda vžiga (2). Vpliv na zamudo vžiga pa ni tako izrazit, saj imata krajša zamuda vžiga in trenutna sprememba razmernika zraka med zamudo vžiga nasprotni učinek. Količina vbrizganega goriva med zamudo vžiga se zaradi krajše zamude zmanjša. Trajanje zgorevanja ostaja konstantno in je odvisno od sestave delovnega medija in hitrosti zgorevanja.

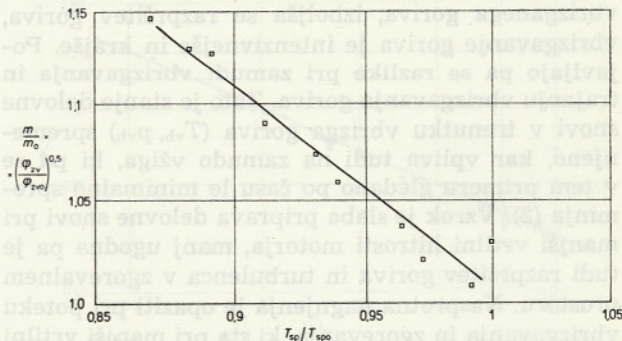


Sl. 8. Poteki zgorevanja pri spremenjeni vstopni temperaturi delovne snovi (preizkus) $\lambda = 2,54$, $\gamma = 0,03$, $p_{sp} = 1,2 \cdot 10^5$ Pa, $n = 1750$ vrt./min, $\varphi_{zv} = 22,5^\circ$

Na sliki 9 so podane vrednosti $(m \varphi_{zv})^{0,492}$ v odvisnosti od temperature delovne snovi na vstopu. Opaziti je, da se vrednosti v diagramu z dvojno logaritemsko skalo razvrstijo po premici z naklonskim koeficientom $-0,982$

$$\frac{m}{m_0} \left(\frac{\varphi_{zv}}{\varphi_{zvo}} \right)^{0,492} = \left(\frac{T_{sp}}{T_{sp0}} \right)^{-0,982} \quad (11)$$

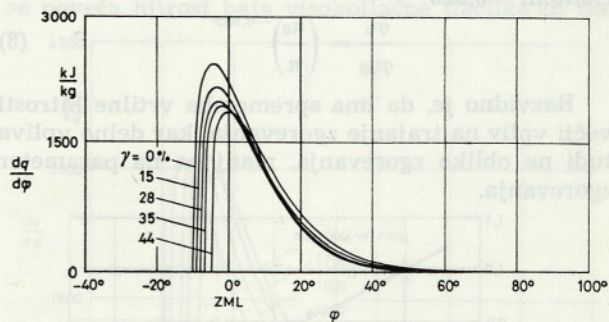
Z višanjem temperature delovne snovi se vrednost parametra zgorevanja proporcionalno zmanjšuje.



Sl. 9. Vpliv temperature polnjenja valja na parameter zgorevanja (preizkus)
 $(m/m_0) (\varphi_{zv}/\varphi_{zvo})^{0,492} = (T_{sp}/T_{sp0})^{-0,982}$

3.5. Delež zaostalih plinov

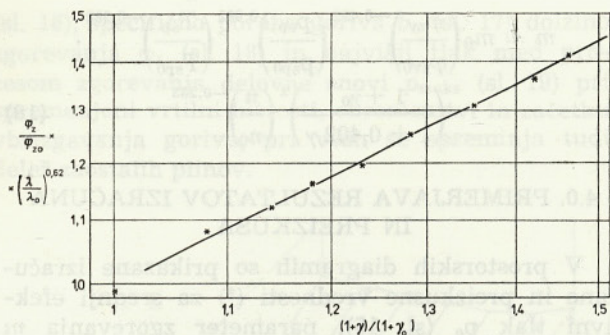
S povečanim deležem zaostalih plinov v delovni snovi pri stalno enakih veličinah, ki definirajo obratovanje motorja, tj. razmernik zraka, vrtilna hitrost, začetek vbrizgavanja goriva in tlak delovne snovi na vstopu, se v pretežni meri vpliva na količino svežega zraka, ki je posledica zvišane temperature. Hkrati pa se del svežega zraka zamenja z vrnjenimi produkti zgorevanja. Temperaturna sprememba se pojavi zaradi prestopa toplote z neohlajenih vrnjenih produktov zgorevanja na sveži zrak. S tem se vpliva tudi na zamudo vžiga. Izkaže se, da imata krajša zamuda vžiga, katerega vzrok je povišana temperatura in sprememba notranjega razmernika zraka nasproten učinek. Količina vbrizganega goriva med zamudo vžiga se poveča, vzrok za to je manjša masa v valj vsesanega zraka. Povišanje temperature izhodiščnih snovi sicer okrepi difuzijske procese, vendar povečanje deleža negorljivih snovi, ki jih vsebujejo zaostali plini, vedno zmanjšujejo hitrost zgorevanja. S slike 10 je razvidno, da navzočnost zaostalih plinov ne vpliva samo na zamudo vžiga in obliko zgorevanja, podaljša se tudi čas zgorevanja delovne snovi.



Sl. 10. Poteki zgorevanja pri spremenjenem deležu zaostalih plinov (preizkus) $\lambda = 2,54$, $p_{sp} = 1,2 \cdot 10^5$ Pa, $\varphi_{zv} = -25^\circ$ RG, $n = 2000$ vrt./min

Na sliki 11 so prikazane vrednosti za trajanje zgorevanja delovne snovi v odvisnosti od deleža zaostalih plinov.

Preizkusi kažejo, da se trajanje zgorevanja pri enakem referenčnem kotu zasuka ročične gredi več



Sl. 11. Vpliv deleža zaostalih plinov na trajanje zgorevanja delovne snovi (preizkus)
 $(\varphi_z/\varphi_{z0})^{0,62} = [(1 + \gamma)/(1 + \gamma_0)]^{0,91}$

z večanjem deleža zaostalih plinov. Vrednosti v diagramu z dvojno logaritemsko skalo se razvrstijo po skupni premici z naklonskim koeficientom 0,91

$$\frac{\varphi_z}{\varphi_{z0}} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{0,62} = \left(\frac{1 + \gamma}{1 + \gamma_0} \right)^{0,91} \quad (12)$$

Pri tem je treba upoštevati še spremembo razmernika zraka, ki ga povzročajo vrtni produkti zgorevanja (19)

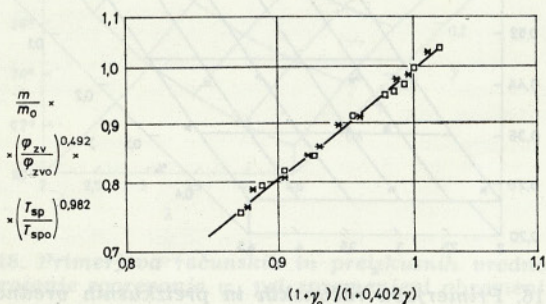
$$\lambda_n = \frac{\lambda - \gamma}{1 - \gamma} \quad (13)$$

Tako dobi izraz za spremembo trajanja zgorevanja naslednjo obliko

$$\frac{\varphi_z}{\varphi_{z0}} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_0} \right)^{0,62} = \left(\frac{1 + \gamma}{1 + \gamma_0} \right)^{0,91} \quad (14)$$

Vpliv zaostalih plinov na parameter zgorevanja je prikazan na sliki 12. S povečanim deležem zaostalih plinov se vpliva na zamudo vžiga ter količino in kakovost delovne snovi v valju motorja. Vpliv zamude vžiga, ki je posledica zvišane temperature, je izločen z vrednostjo $(m \varphi_{zv})^{0,492}$. Navedena vrednost se v odvisnosti od spremembe zaostalih plinov pri stalno enakem tlaku polnjenja valja spreminja po premici z naklonskim koeficientom 2.

$$\frac{m}{m_0} \left(\frac{\varphi_{zv}}{\varphi_{zv0}} \right)^{0,492} \left(\frac{T_{sp}}{T_{sp0}} \right)^{0,982} = \left(\frac{1 + \gamma_0}{1 + 0,402 \gamma} \right)^2 \quad (15)$$



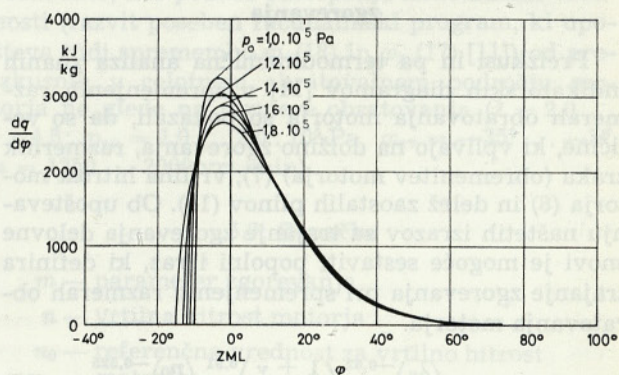
Sl. 12. Vpliv deleža zaostalih plinov na parameter zgorevanja (preizkus)

$$(m/m_0) (\varphi_{zv}/\varphi_{zv0})^{0,492} (T_{sp}/T_{sp0})^{0,982} = [(1 + \gamma)/(1 + 0,402 \gamma)]^2$$

Referenčna vrednost koeficienta zaostalih plinov ($\gamma = 0,03$) [11], ki se pojavlja v izrazih (14) in (15), je ovrednotena med preizkusom za pogoj obratovanja motorja, ko ni vzpostavljena recirkulacija izpušnih plinov.

3.6. Tlak polnjenja valja

Na sliki 13 so prikazani rezultati preizkusov za stalno enake veličine razmernika zraka, deleža zaostalih plinov, vrtilne hitrosti motorja in začetka vbrizgavanja goriva v valj, spreminja se tlak polnjenja valja. Razmernik zraka ostane nespremenjen, ker se sorazmerno z višanjem tlaka polnjenja valja spreminja tudi količina vbrizganega goriva. Pri nižjih tlakih polnjenja valja se pojavijo višje začetne vrednosti potekov zgorevanja (sl. 13). Razlike se pojavijo samo zaradi količine vbrizganega goriva [7], [11], [18]. Za vsa stanja polnjenja valja so ploščine pod poteki zgorevanja delno enake. Zamuda vžiga ni več stalno enaka, ampak se z naraščanjem tlaka polnjenja valja krajša. Vzrok tega je sprememba stanja delovne snovi na kompresijski krivulji v trenutku vbrizgavanja goriva, zvišata se tlak in temperatura (p_{vb} , T_{vb}). Začetek zgorevanja delovne snovi je v obratnem razmerju s tlakom polnjenja valja, ker se med zamudo vžiga pripravljena količina goriva na samem začetku vbrizgavanja spreminja.



Sl. 13. Poteki zgorevanja pri spremenjenem tlaku polnjenja (preizkus) $\lambda = 2,25$, $\gamma = 0,03$, $n = 1500$ vrt./min, $\varphi_{zv} = -28^\circ$ RG

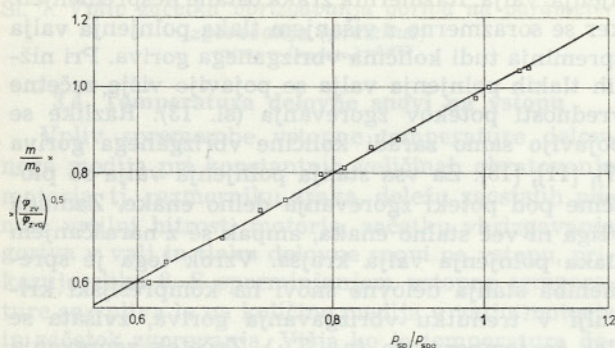
Trajanje zgorevanja delovne snovi je praktično stalno enako, čeprav so dolžine vbrizgavanja goriva med seboj različne [11], [18].

Preizkusi so pokazali, da sprememba tlaka polnjenja valja pri enakem skupnem razmerniku zraka vpliva na začetek zgorevanja, ta je posledica spremembe zamude vžiga, in obliko ter največjo začetno vrednost poteka zgorevanja, sprememba trajanja zgorevanja pa je neopazna.

S spremembo tlaka polnjenja valja se vpliva na potek kompresijske krivulje in s tem na stanje delovne snovi, na zamudo vžiga in tudi na količino delovne snovi v valju motorja.

Vpliv zamude vžiga je izločen z vrednostjo $(m \varphi_{zv})^{0,492}$. To se doseže tako, da se poiščejo navedene vrednosti v odvisnosti od tlaka polnjenja delovne snovi. Vrednosti so razvrščene v diagramu z dvojno logaritemsko skalo po premici z naklonskim koeficientom 0,992. Opažamo, da se parameter zgorevanja spreminja skoraj proporcionalno s količino delovne snovi v valju motorja (sl. 14).

$$\frac{m}{m_0} \left(\frac{\varphi_{zv}}{\varphi_{zv0}} \right)^{0,402} = \left(\frac{p_{sp}}{p_{sp0}} \right)^{0,992} \quad (16)$$



Sl. 14. Vpliv tlaka polnjenja valja na parameter zgorevanja (preizkus)
 $(m/m_0) (\varphi_{zv}/\varphi_{zv0})^{0,492} = (p_{sp}/p_{sp0})^{0,992}$

3.7. Končna oblika izrazov za parameter in dolžino zgorevanja

Preizkusi in pa termodinamična analiza znanih indikatorskih diagramov [11] v spremenjenih razmerah obratovanja motorja so pokazali, da so veličine, ki vplivajo na dolžino zgorevanja, razmernik zraka (obremenitev motorja) (7), vrtilna hitrost motorja (8) in delež zaostalih plinov (14). Ob upoštevanju naštetih izrazov za trajanje zgorevanja delovne snovi je mogoče sestaviti popolni izraz, ki definira trajanje zgorevanja pri spremenjenih razmerah obratovanja motorja.

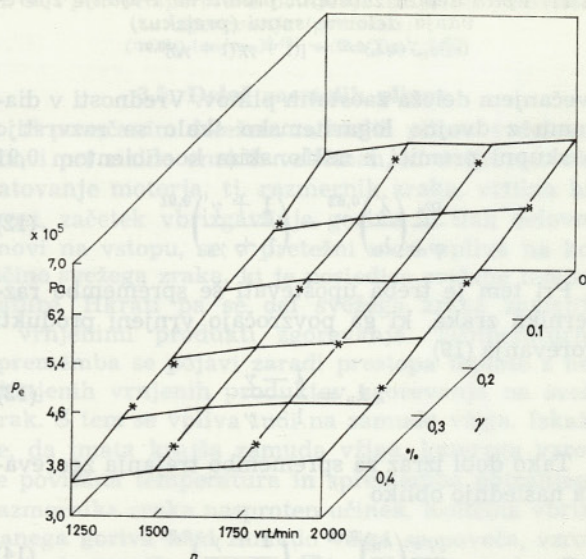
$$\varphi_z = \varphi_{z0} \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_0} \right)^{-0,62} \left(\frac{1 + \gamma}{1 + \gamma_0} \right)^{0,91} \left(\frac{n_0}{n} \right)^{-0,525} \quad (17)$$

Začetna oblika poteka zgorevanja se spreminja s količino med zamudo vžiga v valj vbrizganega goriva. Parameter zgorevanja pa se spreminja nasprotno s količino vbrizganega goriva. Rezultati preizkusa kažejo, da so kazalniki, ki vplivajo na parameter zgorevanja, zamuda vžiga (10), temperatura delovne snovi na vstopu (11), vrtilna hitrost motorja (9), delež zaostalih plinov (15) in tlak polnjenja valja (16). Z naraščanjem vrtilne hitrosti motorja se poveča zamuda vžiga. To pa vpliva na zmanjšanje vrednosti parametra zgorevanja zaradi spremembe $(\varphi_{zv}/\varphi_{zv0})^{-0,492}$. S kombinacijo izrazov za parameter zgorevanja je mogoče zapisati odvisnost parametra zgorevanja od obratovalnih razmer v motorju.

$$m = m_0 \left(\frac{\varphi_{zv}}{\varphi_{zv0}} \right)^{-0,492} \left(\frac{p_{sp}}{p_{sp0}} \right)^{0,992} \left(\frac{T_{sp}}{T_{sp0}} \right)^{-0,982} \cdot \left(\frac{1 + \gamma_0}{1 + 0,402 \gamma} \right)^2 \left(\frac{n}{n_0} \right)^{-0,233} \quad (18)$$

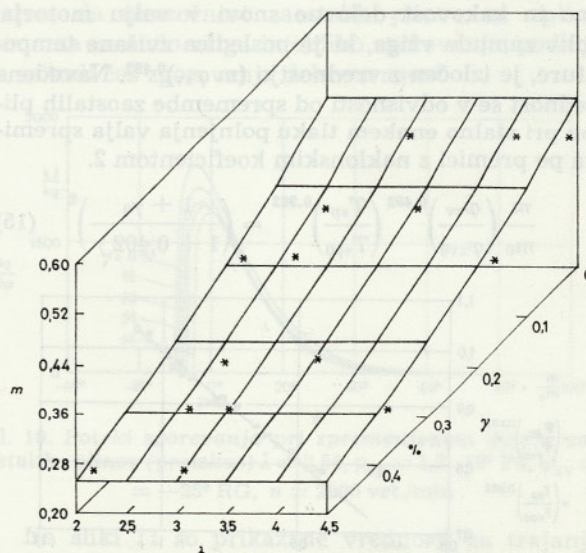
4.0. PRIMERJAVA REZULTATOV IZRAČUNA IN PREIZKUSA

V prostorskih diagramih so prikazane izračunane in preizkusne vrednosti (*) za srednji efektivni tlak p_e (sl. 15), parameter zgorevanja m



Sl. 15. Primerjava računskih in preizkusnih vrednosti za p_e pri spremenjeni n in γ

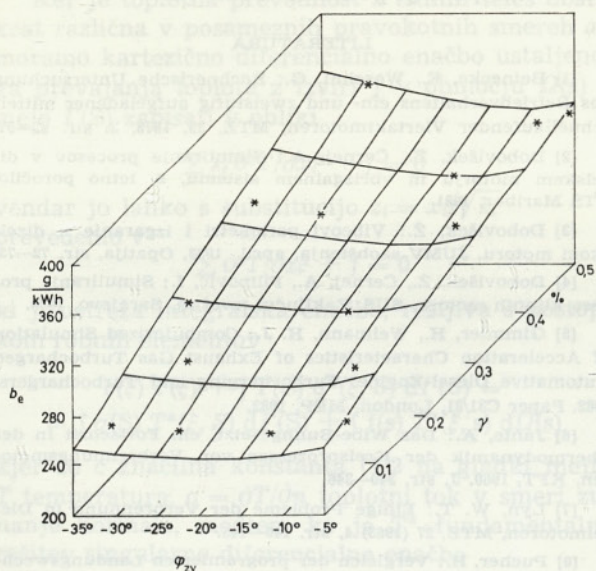
Izmerki pri preizkusu z: $\varepsilon = 17$, $\varphi_{zv} \approx -20^\circ$, $p_0 = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, $\lambda \approx 4,5$. Računske vrednosti z: $\varepsilon = 17$, $\varphi_{zv} = -20^\circ$, $p_0 = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, $\lambda = 4,5$



Sl. 16. Primerjava računskih in preizkusnih vrednosti za parameter m pri spremenjeni obremenitvi in γ

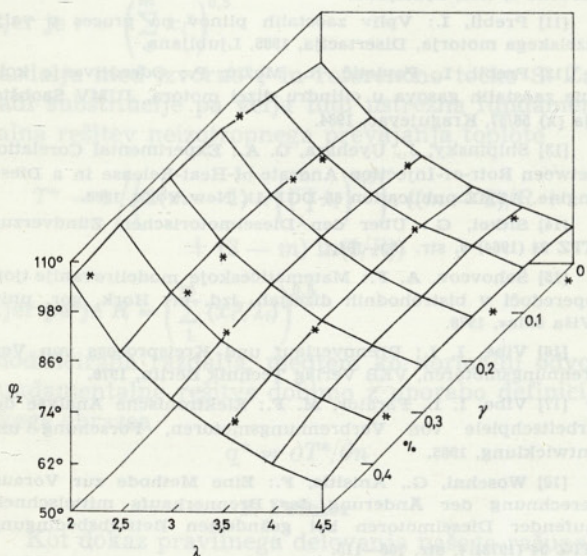
Izmerki pri preizkusu z: $n \approx 1750$ vrt./min, $\varepsilon = 17$, $\varphi_{zv} \approx -35^\circ$, $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Pa. Računske vrednosti z: $n = 1750$ vrt./min, $\varepsilon = 17$, $\varphi_{zv} = -35^\circ$, $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Pa

(sl. 16), specifično porabo goriva b_e (sl. 17) dolžino zgorevanja φ_z (sl. 18) in najvišji tlak med procesom zgorevanja delovne snovi p_{maks} (sl. 19) pri spremenjeni vrtilni hitrosti, obremenitvi in začetku vbrizgavanja goriva, pri vseh se spreminja tudi delež zaostalih plinov.



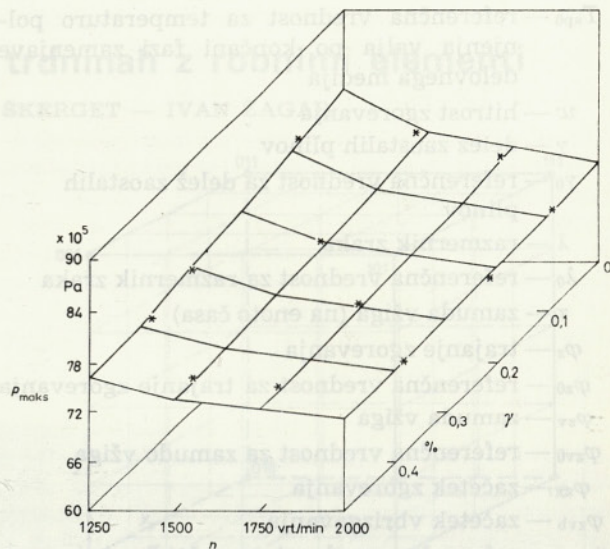
Sl. 17. Primerjava računskih in preizkusnih vrednosti za b_e pri spremenjenem φ_{zv} in γ

Izmerki pri preizkusu z: $n \approx 1500$ vrt./min, $\varepsilon = 17$, $p_0 = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, $\lambda \approx 2,5$. Računske vrednosti z: $n = 1500$ vrt./min, $\varepsilon = 17$, $p_0 = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, $\lambda = 2,5$



Sl. 18. Primerjava računskih in preizkusnih vrednosti za trajanje zgorevanja φ_z pri spremenjeni obremenitvi in γ

Izmerki pri preizkusu z: $n \approx 1750$ vrt./min, $\varepsilon = 17$, $\varphi_{zv} \approx -35^\circ$, $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Pa. Računske vrednosti z: $n = 1750$ vrt./min, $\varepsilon = 17$, $\varphi_{zv} = -35^\circ$, $p_0 = 1 \cdot 10^5$ Pa



Sl. 19. Primerjava računskih in preizkusnih vrednosti p_{maks} pri spremenjeni n in γ

Izmerki pri preizkusu z: $\varepsilon = 17$, $\varphi_{zv} \approx -20^\circ$, $p_0 = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, $\lambda \approx 4,5$. Računske vrednosti z: $\varepsilon = 17$, $\varphi_{zv} = -20^\circ$, $p_0 = 1,6 \cdot 10^5$ Pa, $\lambda = 4,5$

Analiza primerjave kaže, da se rezultati ujemajo z natančnostjo ± 3 odstotke [11], [12].

Prikaz primerjave rezultatov je primeren predvsem zato, ker pokaže odstopanje izračunanih vrednosti (razvit poseben računalniški program, ki upošteva tudi spremembo m (18) in φ_z (17) [11]) od preizkusnih v celotnem obratovalnem področju motorja ne glede na razmere obratovanja ($\lambda = 2,0 \dots 4,5$; $p_{sp} = 1,0 \dots 2,0 \cdot 10^5$ Pa, $\varphi_{zv} = -35^\circ \dots -5^\circ$, $n = 1250 \dots 2000$ vrt./min).

5.0. Označbe

- m — parameter zgorevanja
- n — vrtilna hitrost motorja
- n_0 — referenčna vrednost za vrtilno hitrost motorja
- p_{maks} — najvišji tlak delovne snovi
- p_{sp} — tlak polnjenja valja po končani fazi zamenjave delovnega medija
- p_{sp0} — referenčna vrednost za tlak polnjenja valja po končani fazi zamenjave delovnega medija
- p_{vb} — tlak delovnega medija v trenutku začetka vbrizgavanja
- q — sproščena toplota med procesom zgorevanja
- R — splošna plinska konstanta
- T_{vb} — temperatura delovnega medija v trenutku začetka vbrizgavanja
- T_{sp} — temperatura polnjenja valja po končani fazi zamenjave delovnega medija

T_{sp0} — referenčna vrednost za temperaturo polnjenja valja po končani fazi zamenjave delovnega medija

w — hitrost zgorevanja

γ — delež zaostalih plinov

γ_0 — referenčna vrednost za delež zaostalih plinov

λ — razmernik zraka

λ_0 — referenčna vrednost za razmernik zraka

τ — zamuda vžiga (na enoto časa)

φ_z — trajanje zgorevanja

φ_{z0} — referenčna vrednost za trajanje zgorevanja

φ_{zv} — zamuda vžiga

φ_{zv0} — referenčna vrednost za zamudo vžiga

φ_{zz} — začetek zgorevanja

φ_{zvb} — začetek vbrizgavanja

φ_{zv0} — referenčna vrednost za začetek vbrizgavanja

6.0. SKLEP

Preizkusna, predvsem pa računska analiza posameznih veličin, ki definirajo razmere pri obratovanju motorja in imajo vpliv na parameter zgorevanja m in φ_z , je omogočila naslednje sklepe:

— Pri povečani obremenitvi motorja in stalno enaki vrtilni hitrosti je opaziti podaljšano trajanje zgorevanja.

— S povečanim deležem vrnjenih produktov zgorevanja se vpliva tudi na razmernik zraka (obremenitev motorja). Kot zasuka ročične gredi, pri katerem snov zgoreva, se relativno poveča. Povečuje se do vrednosti $\gamma = 0,2 \dots 0,3$. Pri večji vrednosti koeficienta γ se razmere spremenijo. Povečuje se vpliv notranjega razmernika zraka, kar je razvidno iz krajšega trajanja zgorevanja.

— S povečanjem vrtilne hitrosti motorja in drugih stalno enakih veličin, ki definirajo obratovanje motorja, se kot zasuka ročične gredi, v katerem poteka zgorevanje, pri naši raziskavi poveča.

— Parameter zgorevanja se spreminja v obratnem razmerju z zamudo vžiga oziroma med zamudo vžiga za zgorevanje pripravljenega goriva.

— Delež vrnjenih produktov zgorevanja v delovni snovi je izražen z nižjo vrednostjo parametra zgorevanja m . Vzrok je v povečani zamudi vžiga in dejanskem začetku zgorevanja.

— Stanje na vstopu (tlak in temperatura) vpliva na količino v valj dovedenega zraka in vrnjenih produktov zgorevanja ter na stanje delovne snovi na kompresijski krivulji v trenutku vbrizgavanja goriva v valj T_{vb} , p_{vb} . S tem se spreminja tudi zamuda vžiga. Pri povečanem tlaku polnjenja valja se zamuda vžiga zmanjša, to se kaže na manjši hitrosti sproščanja toplote in višji vrednosti parametra zgorevanja, obratne vrednosti pa se pojavljajo pri zvišani temperaturi.

— Izid raziskave kaže, da vrtilna hitrost motorja vpliva predvsem na zamudo vžiga. Pri povečani vrtilni hitrosti se zamuda vžiga, gledano nad kotom zasuka ročične gredi, večja. Tako se vrednost parametra zgorevanja kot funkcija zamude vžiga manjša. Neposreden vpliv vrtilne hitrosti $(n/n_0)^{-0,233}$ na parameter pa daje podobne vrednosti.

LITERATURA

- [1] Beinecke, E., Woschni, G.: Rechnerische Untersuchung des Betriebverhaltens ein- und zweistufig aufgeladener mittelschnellaufender Viertaktmotoren, MTZ, 39, 1978, 3. str. 93—97.
- [2] Dobovišek, Z., Černej, A.: Simuliranje procesov v dizelskem motorju in vbrizgalnem sistemu, 2. letno poročilo, VTS Maribor, 1981.
- [3] Dobovišek, Z.: Vibeovi parametri i izgaranje u dizelskom motoru, JUMV saobštenja, april 1983, Opatija, str. 72—73.
- [4] Dobovišek, Z., Černej, A., Filipovič, I.: Simuliranje procesa klipnih motora, SUS, Zaključni izveštaj, Sarajevo, 1980.
- [5] Gimmler, H., Weimann, H. J.: Computerized Simulation of Acceleration Characteristics of Exhaust Gas Turbocharged Automotive Diesel-Engine. Turbocharging and Turbochargers, 1982. Paper C31/81, London, MEP, 1982.
- [6] Jante, A.: Das Wibe-Bunngesetz, ein Fortschritt in der Thermodynamik der Kreisprozessen von Verbrennungsmotoren, KFT, 1960, J. str. 340—346.
- [7] Lyn, W. T.: Einige Probleme der Verbrennung in Dieselmotoren, MTZ, 27 (1963) 4, str. 140—145.
- [8] Pucher, H.: Vergleich der programmierten Landungswechselrechnung für Viertakt Dieselmotoren nach der Charakteristiktheorie und Füll- und Entleer-Methode. Diss. Braunschweig, Tech. Universität, 1975.
- [9] Huber, E., Schley, Vogt, R.: Beitrag zur Berechnung der Stickoxidbildung in Dieselmotor, MTZ, 39, 1978, 5. str. 235—237.
- [10] Pavletič, R., Prebil, I.: Vpliv zaostalih plinov na proces v valju dizelskega motorja, letno poročilo 1, 1981, letno poročilo 2, 1982, Ljubljana.
- [11] Prebil, I.: Vpliv zaostalih plinov na proces v valju dizelskega motorja, Disertacija, 1985, Ljubljana.
- [12] Prebil, I., Pavletič, R., Mužič, P.: Odredjivanje količine zaostalih gasova u cilindru dizel motora, JUMV Saobštenja (x) 56/57, Kragujevac, 1984.
- [13] Shipinsky, J., Uyehara, O. A.: Experimental Correlation Between Rotr-of-Injection Andrate-of-Heat-Release in a Diesel Engine, ASME publication 68-DGP-11, New York, 1968.
- [14] Sitkei, G.: Über den Dieselmotorischen Zündverzug, MTZ 24 (1964) 6, str. 190—194.
- [15] Šehovcov, A. F.: Matematičeskoje modelirovanije tjoploperedoči v bistrohodnih dizeljah, izd. pri Hork. gor. univ. »Viša šola«, 1978.
- [16] Vibe, I. I.: Brennverlauf und Kreisprozess von Verbrennungsmotoren, VEB Verlag Technik Berlin, 1970.
- [17] Vibe, I. I., Farator, M. F.: Elektronische Analyse der Arbeitschpiele von Verbrennungsmotoren, Forschung und Entwicklung, 1965.
- [18] Woschni, G., Anisitis, F.: Eine Methode zur Vorausberechnung der Änderung der Brennerhaufs mittelschnellaufender Dieselmotoren bei geänderten Betriebsbedingung, MTZ 34 (1973) 4, str. 106—115.
- [19] Pavletič, R.: Vpliv zaostalih plinov na delovni proces in emisijo motorjev z notranjim zgorevanjem, SV (1974) 4, str. 151—160.

Naslov avtorjev: dr. Ivan Prebil, dipl. inž.

prof. dr. Radislav Pavletič, dipl. inž.

Fakulteta za strojništvo, Ljubljana