

MODELLING OF AN UNREPEATABILITY OF MEAN INDICATED PRESSURE IN INDIVIDUAL CYLINDERS OF BIOGAS ENGINE

Karol Cupiał, Grzegorz Katolik

Technical University of Częstochowa
Institute of Internal Combustion Engine and Control Engineering
al. Armii Krajowej 21, 42-200 Częstochowa
tel. +48 34 3250507 fax. +48 34 3250555
e-mail: cupial@imc.pcz.czest.pl, katolik@imc.pcz.czest.pl

Abstract

Results of modelling unrepeatability of work in individual cylinders of turbocharged biogas engine are presented in this paper. Modelling was carried out with using zero-dimension, two-zone engine model, which takes into account variable mole fractions of ten half-ideal gases

Simplified method of modelling of unrepeatability of elementary indicated work in multi-cylinder engine was described. Model utilized in this paper permits to reach the satisfactory agreement of statistical value of selected engine work cycle series parameters. This method assumes proportionality of standard deviation values of four selected parameters and standard deviation of elementary indicated work. Results of performed works indicated lack opportunity of exact modelling of the non-recurrence of the individual indicated work of the series working cycles of each cylinders at assumption of the proportionality of the value of standard deviations of four process parameters for the value of the standard deviation indicated work. The iterative method lets on the obtainment of considerably more exact results, demands however greater expenditures of labour and is time-consuming. The modification of the computational program, so that once the begun computational process in turn iteratively change values indicated parameters of the model until the moment of the obtainment of results of the established accuracy of calculations what is necessary for the obtainment good results.

Keywords: IC engines, modelling of engine work cycle, cycle-by-cycle variations

MODELOWANIE NIEPOWTARZALNOŚCI CIŚNIENIA INDYKOWANEGO W POSZCZEGÓLNYCH CYLINDRACH SILNIKA GAZOWEGO

Streszczenie

W pracy przedstawione zostały wyniki modelowania niepowtarzalności pracy poszczególnych cylindrów doladowanego silnika biogazowego. Modelowanie przeprowadzone zostało z wykorzystaniem zerowymiarowego, dwustrefowego modelu procesu wydzielania ciepła uwzględniającego zmienne udziały molowe dziesięciu gazów półdoskonałych.

Omówiona została uproszczona metoda modelowania niepowtarzalności pracy indykowanej serii cykli wielocylindrowego silnika spalinowego ze szczególnym uwzględnieniem analizy możliwej do uzyskania zgodności statystycznych parametrów charakteryzujących serie cykli pracy. Metoda uproszczona polega na założeniu proporcjonalności wartości odchyłeń standardowych czterech parametrów obiegu do wartości odchylenia standardowego pracy indykowanej. Rezultaty wykonanych prac wskazują na brak możliwości dokładnego modelowania niepowtarzalności jednostkowej pracy indykowanej serii cykli pracy poszczególnych cylindrów przy założeniu proporcjonalności wartości odchyłeń standardowych czterech parametrów obiegu do wartości odchylenia standardowego pracy indykowanej. Metoda iteracyjna, pozwala na uzyskanie znacznie dokładniejszych wyników, wymaga jednak większych nakładów pracy i jest czasochłonna. Modyfikacja programu obliczającego, tak by raz rozpoczęty proces obliczeniowy kolejno iteracyjnie zmieniał wartości wskazanych parametrów modelu, aż do momentu uzyskania wyników o założonej dokładności obliczeń jest niezbędna dla uzyskania zadawalających wyników.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, modelowanie obiegu pracy, niepowtarzalność cykli

1. Niestacjonarny model obiegu silnika

Modelowanie niepowtarzalności obiegów silnika ma na celu umożliwienie uwzględnienia niepowtarzalności kolejnych cykli pracy silnika m.in. w analizie dynamiki mechanizmu korbowego i odbiornika mocy, a także przy dokładnej analizie procesów ciepło-chemicznych zachodzących w poszczególnych cyklach pracy silnika. Jest to zagadnienie o dość istotnym znaczeniu, zwłaszcza w przypadku zespołów prądotwórczych napędzanych silnikami biogazowymi, charakteryzującymi się większą niepowtarzalnością obiegów niż silniki wysokoprężne napędzane paliwami ciekłymi. Model, w którym w każdym kolejnym cyklu zmianie ulega wartość wybranych, charakterystycznych jego parametrów, pozwala w silniku biogazowym pracującym bezstukowo osiągnąć zadowalającą zgodność wartości jednostkowej pracy indykowanej.

Modelowanie przeprowadzone zostało z wykorzystaniem zerowymiarowego, dwustrefowego modelu obiegu silnika [2], w którym proces wydzielania ciepła opisany został funkcją Vibe [6]

$$\Delta x_{\text{spal}}(\varphi) = 1 - \exp\left(-a \cdot \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{ps}}}{\varphi_{\text{spal}}}\right)^{m+1}\right), \quad (1)$$

natomiast proces wymiany ciepła opisany został równaniem Woschni [5]

$$\alpha = 130 \cdot D^{-0,2} \cdot p^{0,8} \cdot w^{0,8} \cdot T^{-0,53} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right]. \quad (2)$$

W modelu tym uwzględnione zostały zmienne udziały molowe dziesięciu gazów półdoskonałych: N_2 , O_2 , CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 , C_4H_{10} oraz H_2O .

Dobór parametrów modelu dla serii cykli polegał na takiej zmianie wartości czterech quasilosowo zmiennych jego charakterystycznych parametrów, by osiągnąć jak najlepszą zgodność wybranych parametrów statystycznych opisujących porównywane serie. Wartości parametrów modelu zmieniają się w każdym z cykli pracy i są to:

- rozrzut chwilowych wartości energii jednostkowej ΔE_j (wywołany m.in. zmianami wartości współczynnika napełnienia w kolejnych cyklach) - energia doprowadzona do cylindra, wyrażona iloczynem wartości opałowej mieszanki palnej w warunkach ustalonych (1 bar, 273 K) oraz współczynnika napełnienia cylindra;
- kąt rozwoju płomienia φ_{rp} - kąt od chwili przeskoku iskry elektrycznej do chwili wydzielania 2% ciepła;
- kąt trwania spalania φ_{spal} - kąt od chwili wydzielania 2% ciepła do chwili wydzielania 99,89% ($\approx 100\%$) ciepła;
- względny kąt piku φ_{piku} - iloraz wartości kąta maksymalnego strumienia ciepła oraz wartości kąta trwania spalania

W trakcie modelowania niepowtarzalności uwzględniono także w sposób pośredni niepowtarzalność procesu wymiany ciepła, ponieważ w równaniu Woschni występują przebiegi ciśnienia i temperatury w poszczególnych cyklach. Modelowanie przeprowadzono dla zadanej średniej wartości energii jednostkowej, której wartość i odchylenie standardowe szacowano na podstawie analizy wykresu indykatorowego.

Modelowanie niepowtarzalności oparto na danych empirycznych, uzyskanych w wyniku równoczesnego indykowania wszystkich ośmiu cylindrów doładowanego silnika biogazowego, napędzającego zespół prądotwórczy. Indykowanie tego silnika, obejmującego 362 kolejne cykle pracy, przeprowadzono co 0,5°OWK dla mocy efektywnej silnika 600 kW, co odpowiada $p_i = 1,3 \text{ MJ/m}^3$. Wykorzystano do tego celu seryjne głowice wyposażone w kanały o długości 242 mm, co stanowi 121% średnicy cylindra. W [1] wykazano, że w badanym silniku, pracującym

bezstukowo z niezmienną prędkością obrotową 1000 obr/min, taka długość kanału nie wpływa w istotnym stopniu na wyniki indykowania.

2. Modelowanie serii cykli pracy poszczególnych cylindrów

Modelowanie serii cykli pracy poszczególnych cylindrów silnika przeprowadzone zostało oddzielnie dla każdego cylindra, czterokrotnie dla serii 50-ciu cykli. Wartości wszystkich czterech charakterystycznych parametrów modelu dobierano losowo z empirycznie ustalonego przedziału ich zmienności, o rozkładzie normalnym, a ich zmienność scharakteryzowano odchyleniem standardowym. Wartość odchylenia standardowego dla każdego analizowanego parametru obliczono na podstawie [3]. W [3] odchylenia standardowe czterech charakterystycznych parametrów modelu obliczono analizując iteracyjnie każdy cykl wchodzący w skład serii. Metoda ta była stosunkowo dokładna, ale także bardzo pracochłonna. W tej pracy przedstawiono uproszczoną metodę opartą na wzajemnej relacji względnych odchyłeń standardowych rozrzutów wartości jednostkowej pracy indykowanej oraz analizowanych czterech parametrów modelu obiegu silnika, obliczanych oddzielnie dla każdego z analizowanych cylindrów (wzór 3)

$$\sigma_i = x_i \cdot \sigma_{p_i} \quad (3)$$

Wykorzystując wyniki modelowania iteracyjnego przedstawione w [3] (Tab. 1), obliczone zostały współczynniki liczbowe x wiążące ze sobą wartości względnych odchyłeń standardowych pracy indykowanej σ_p oraz czterech parametrów modelu obiegu silnika $\sigma_{\Delta e_i}$, $\sigma_{\varphi_{rp}}$, $\sigma_{\varphi_{spal}}$ i $\sigma_{\varphi_{piku}}$.

Tab. 1. Wyniki iteracyjnego doboru wartości parametrów modelu
Tab. 1. Results of iterative selection of model parameters values

	Jednostkowa praca indykowana MJ/m ³	Energia jednostkowa MJ/m ³ _v	Kąt rozwoju płomienia °OWK	Kąt trwania spalania °OWK	Względny kąt piku -
Wartość średnia	1,699	4,992	12,6	62,5	0,504
Odchylenie standardowe	0,0375	0,0621	0,72	5,61	0,0215
Odchylenie standardowe [%]	2,21	1,24	5,73	8,97	4,27
Współczynnik liczbowy x*	-	0,56	2,59	4,07	1,98

* - wartość współczynnika x obliczona według wzoru 3

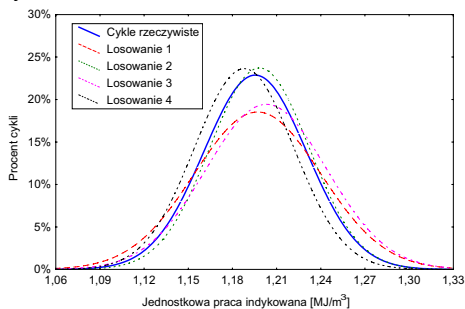
Dane na podstawie [3]

Wartości czterech charakterystycznych parametrów dla poszczególnych cykli otrzymano metodą losowania z zakresu ich zmienności, określonego wartością odchylenia standardowego. Losowanie zostało przeprowadzone przy wykorzystaniu generatora liczb pseudolosowych o rozkładzie normalnym (generator liczb pseudolosowych wykorzystany w pracy jest jedną z funkcji dodatku Analysis ToolPak programu Microsoft® Excel 2000, wchodzącego w skład pakietu Microsoft® Office 2000PL).

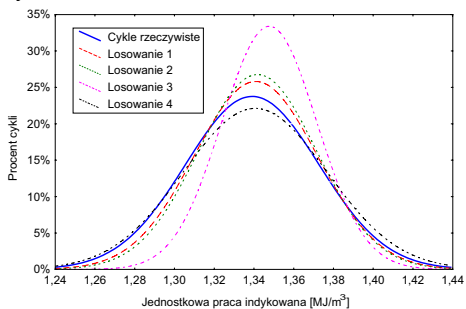
Analizę zgodności pracy indykowanej serii modelowanych cykli z pracą indykowaną obliczoną dla serii cykli rzeczywistych przeprowadzono z wykorzystaniem współczynnika zmienności jednostkowej przy indykowanej COV_{p_i}, który jest statystyczną miarą rozrzutu pracy indykowanej w serii cykli (wzór 4)

$$COV_{p_i} = \frac{\sigma_{p_i}}{p_i} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p}_i)^2}{n-1}}}{p_i} \quad (4)$$

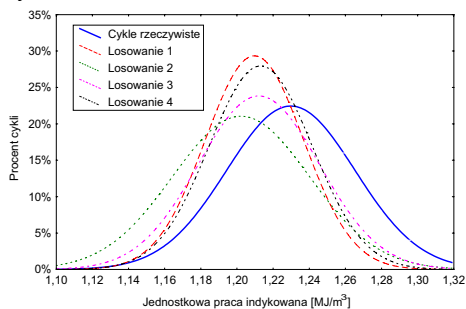
Cylinder 1



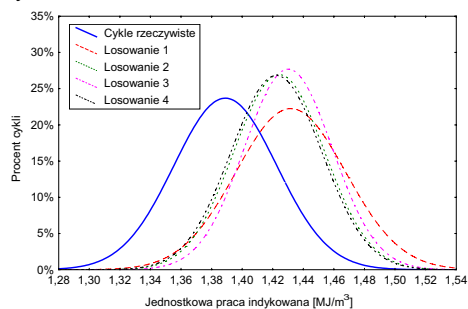
Cylinder 2



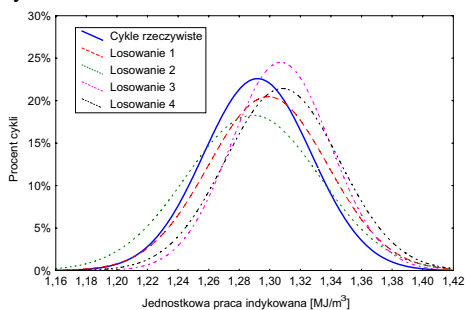
Cylinder 3



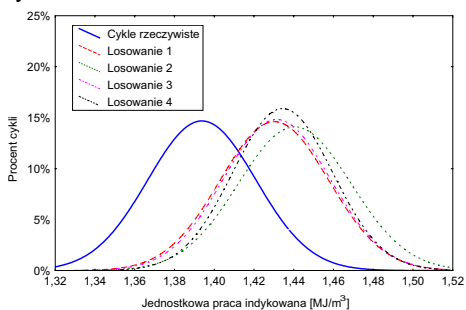
Cylinder 4



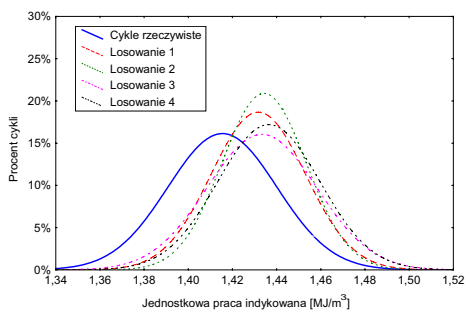
Cylinder 5



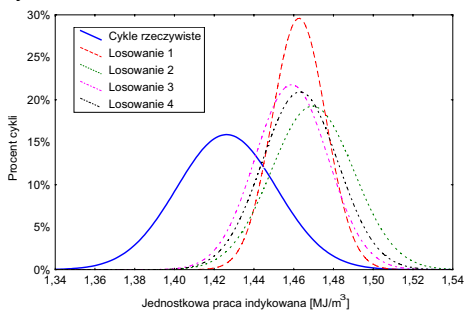
Cylinder 6



Cylinder 7



Cylinder 8



Rys. 1. Rozkłady wartości jednostkowej pracy indykowanej otrzymane w trakcie modelowania serii cykli pracy silnika biogazowego

Fig. 1. Distributions of values of an elementary indicated work obtained during modelling with random selection of model parameters values

gdzie:

σ_{p_i} - odchylenie standardowe wartości jednostkowej pracy indykowanej p_i ,

\bar{p}_i - wartość średnia jednostkowej pracy indykowanej,

n - liczba pomiarów.

W trakcie realizacji pracy przeprowadzone zostało także modelowanie z losowaniem wartości parametrów z zakresów zmienności określonymi identycznymi, jak w przypadku rozrzutu jednostkowej pracy indykowanej, względnymi odchyleniami standardowymi. Wyniki modelowania, które otrzymano dla tak obliczonych wartości σ , jednoznacznie wskazały na brak możliwości wykorzystania tej metody w praktyce.

Na rys. 1 przedstawiono porównanie rozkładów rzeczywistych wartości jednostkowej pracy indykowanej w poszczególnych cylindrach oraz rozkładów otrzymanych w wyniku modelowania z losowym doбором wartości wybranych parametrów modelu.

Analiza wartości średnich jednostkowej pracy indykowanej (Tab. 2) wskazuje na niewielkie rozbieżności pomiędzy wartościami obliczonymi dla serii cykli rzeczywistych i modelowanych. Różnice względne wartości średnich p_i rzeczywistych i modelowanych zawierają się w granicach -3,35...2,24%. Większe względne różnice wartości występują w odniesieniu do odchyłeń standardowych, osiągając maksymalną wartość 46,27%.

Tab. 2. Rzeczywiste oraz modelowane wartości średnie oraz odchylenie standardowe pracy indykowanej w poszczególnych cylindrach silnika biogazowego

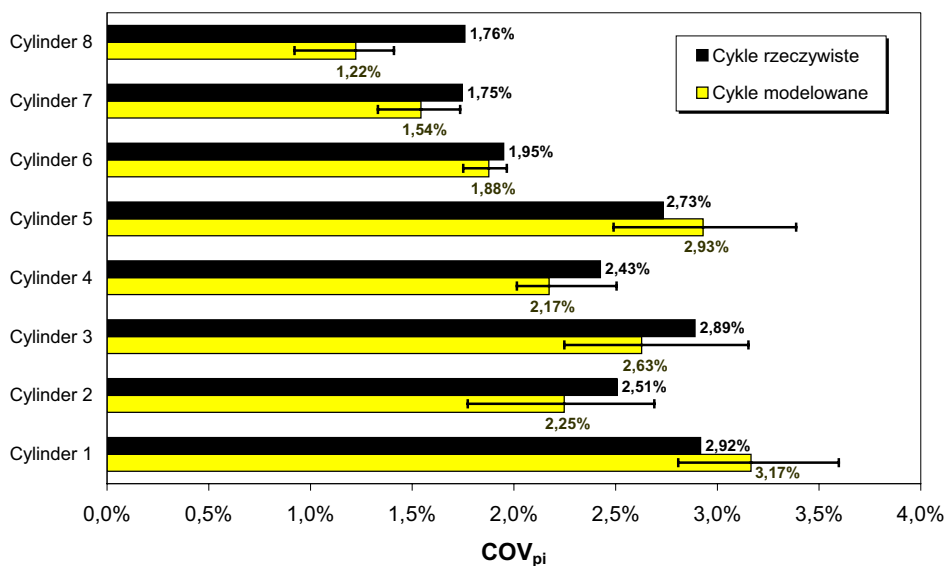
Tab. 2. Real and modelled mean and standard deviation values of elementary indicated work in individual cylinders of biogas engine

Wartość średnia p_i [MJ/m ³]	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4	Cylinder 5	Cylinder 6	Cylinder 7	Cylinder 8
Rzeczywiste	1,195	1,339	1,230	1,389	1,292	1,394	1,415	1,426
Losowanie 1	1,197	1,341	1,210	1,432	1,299	1,430	1,432	1,463
Losowanie 2	1,198	1,342	1,202	1,424	1,289	1,441	1,434	1,469
Losowanie 3	1,203	1,348	1,212	1,430	1,307	1,431	1,433	1,459
Losowanie 4	1,188	1,341	1,213	1,422	1,308	1,434	1,436	1,463
Różnica względna [%]	-0,63...0,63	-0,64...-0,11	1,36...2,24	-3,08...-2,41	-1,25...0,24	-3,35...-2,62	-1,48...-1,15	-3,03...-2,29
Odchylenie standardowe p_i [MJ/m ³]	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4	Cylinder 5	Cylinder 6	Cylinder 7	Cylinder 8
Rzeczywiste	0,0349	0,0336	0,0356	0,0337	0,0353	0,0272	0,0247	0,0251
Losowanie 1	0,0431	0,0309	0,0272	0,0359	0,0390	0,0273	0,0214	0,0135
Losowanie 2	0,0336	0,0298	0,0379	0,0296	0,0437	0,0283	0,0191	0,0207
Losowanie 3	0,0411	0,0239	0,0335	0,0288	0,0325	0,0269	0,0249	0,0183
Losowanie 4	0,0338	0,0361	0,0285	0,0297	0,0372	0,0251	0,0232	0,0191
Różnica względna [%]	-23,25...3,54	-7,42...28,83	-6,62...23,51	-6,46...14,47	-23,60...7,86	-4,11...7,62	-0,64...22,75	17,41...46,27

Porównanie wartości COV_{p_i} (Tab. 3 oraz Rys. 2) obliczonych dla serii cykli rzeczywistych i odpowiadających im serii modelowanych wskazuje na występowanie niewielkich różnic tych wartości, nieprzekraczających 0,52%.

Tab. 3. Porównanie wartości COV_{pi} obliczonych dla pracy indykowanej rzeczywistych i modelowanych serii cykli pracyTab. 3. Comparison of $C COV_{pi}$ values calculated for real and modelled series of elementary indicated work

COV_{pi} [%]	Cylinder 1	Cylinder 2	Cylinder 3	Cylinder 4	Cylinder 5	Cylinder 6	Cylinder 7	Cylinder 8
Rzeczywiste	2,92%	2,51%	2,89%	2,43%	2,73%	1,95%	1,75%	1,76%
Losowanie 1	3,60%	2,31%	2,25%	2,50%	3,00%	1,91%	1,49%	0,92%
Losowanie 2	2,81%	2,22%	3,15%	2,08%	3,39%	1,96%	1,33%	1,41%
Losowanie 3	3,41%	1,77%	2,76%	2,01%	2,49%	1,88%	1,74%	1,26%
Losowanie 4	2,84%	2,69%	2,35%	2,09%	2,85%	1,75%	1,61%	1,30%
$COV_{pi}-COV_{pi i}$	-0,36...0,43	-0,47...0,44	-0,38...0,52	-0,16...0,33	-0,44...0,46	-0,13...0,09	-0,21...0,19	-0,30...0,19

Rys. 2. Porównanie wartości COV_{pi} obliczonych dla pracy indykowanej rzeczywistych i modelowanych serii cykli pracyFig. 2. Comparison of $C COV_{pi}$ values calculated for real and modelled series of elementary indicated work

Wyniki statystycznej analizy porównawczej modelowanych oraz odpowiadających im rzeczywistych serii cykli pracy wskazują na występowanie niewielkich rozbieżności w otrzymanych wartościach średniej jednostkowej pracy indykowanej w analizowanych seriach. Większe różnice występują pomiędzy odchyleniami standardowymi σ_{pi} obliczonymi dla serii rzeczywistych i modelowanych cykli pracy doładowanego silnika biogazowego, pracującego bezstukowo.

3. Podsumowanie

Przedstawione w pracy modelowanie serii cykli pracy poszczególnych cylindrów silnika biogazowego pracującego bezstukowo zostało przeprowadzone z wykorzystaniem zerowymiarowego, dwustrefowego modelu obiegu pracy silnika. Przedstawiona w pracy uproszczona metoda losowego doboru wartości wymaga wcześniejszej analizy statystycznej serii cykli rzeczywistych w celu ustalenia granic zmienności i odchylenia standardowego wartości wybranych parametrów modelu.

Porównanie wartości średnich jednostkowych prac indykowanych rzeczywistych oraz modelowanych, otrzymanych w wyniku modelowania z losowym doбором wartości wybranych parametrów modelu, wskazuje na występowanie niewielkich różnic tych wartości. Zawierają się one w granicach -3,35...2,41%, w przypadku niektórych cylindrów wartości te są znacznie niższe. Analiza porównawcza odchyłeń standardowych rozrzutów rzeczywistych i modelowanych wartości jednostkowej pracy indykowanej wskazuje na występowanie względnych różnic tych wartości na maksymalnym poziomie 46,27%, w większości przypadków różnice te nie przekraczają 25%.

Wartości COV_{pi} , otrzymane w wyniku stosowania metody losowego doboru wartości parametrów modelu, w niewielkim stopniu różnią się od wartości COV_{pi} obliczonych dla serii cykli rzeczywistych w poszczególnych cylindrach. Względne wartości różnic tych wielkości nie przekraczają 0,52%.

Metoda losowego doboru wartości wybranych parametrów modelu wymaga wcześniejszego określenia zakresów zmienności, z których to zakresów losowane są ich wartości. Zaproponowana w pracy uproszczona metoda określenia wzajemnych relacji odchyłeń standardowych parametrów na podstawie wyników modelowania iteracyjnego pozwala na otrzymanie porównywalnych wartości średnich serii rzeczywistych oraz modelowanych wartości jednostkowej pracy indykowanej, natomiast większe rozbieżności występują w przypadku wartości odchyłeń standardowych. Modelowanie przeprowadzone przy założeniu identycznych względnych odchyłeń standardowych wszystkich parametrów modelu wykazało, że takie podejście nie daje zadowalających rezultatów. Porównanie wyników modelowania z iteracyjnym oraz z uproszczonym losowym doбором wartości parametrów wskazuje na lepsze wyniki w przypadku doboru iteracyjnego.

Porównanie wszystkich analizowanych wielkości (\bar{p}_i , σ_{pi} oraz COV_{pi}) wskazuje na brak możliwości dokładnego modelowania niepowtarzalności jednostkowej pracy indykowanej serii cykli pracy poszczególnych cylindrów przy założeniu proporcjonalności wartości odchyłeń standardowych czterech parametrów obiegu do wartości odchylenia standardowego pracy indykowanej. Metoda iteracyjna, przedstawiona w [3], pozwala na uzyskanie znacznie dokładniejszych wyników, wymaga ona jednak znacznie większych nakładów pracy i jest stosunkowo czasochłonna. Wyjściem z tej sytuacji jest modyfikacja programu obliczającego tak, by raz rozpoczęty proces obliczeniowy, na podstawie odpowiednich procedur, kolejno iteracyjnie zmieniał wartości wskazanych parametrów modelu, aż do momentu uzyskania wyników o założonej dokładności obliczeń.

Literatura

- [1] Cupiał, K., Dużyński, A., Grzelka, J., *The Effect of Sensor Positioning on the Variation of Indicated Pressure*, 28th International Scientific Conference on Internal Combustion Engines KONES 2002, "JOURNAL OF KONES - Internal Combustion Engines" 8-11.09.2002 Jurata, Vol. 9, No. 3-4 str. 21-33.
- [2] Cupiał, K., „*Silnik*” wersja 2003.06; Program do analizy obiegu silnika spalinyowego, Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2003.
- [3] Katolik, G., *Zerowymiarowy, statystyczny modelu obiegi silnika*, rozprawa doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2005.
- [4] Volk, W., *Statystyka stosowana dla inżynierów*, WNT, Warszawa 1973.
- [5] Woschni, G., *Beitrag zum Problem des Wärmeüberganges im Verbrennungsmotor*, MTZ 26/4, pp. 128-133.
- [6] Вибе, И. И., *Расчет рабочего цикла двигателя с учетом скорости сгорания и угла опережения воспламенения*, Автомобильная и тракторная промышленность, No 1, pp. 15-23, 1957.

