

**Arkadiusz JAMROZIK, Arkadiusz KOCISZEWSKI, Wojciech TUTAK**  
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ I INFORMATYKI,  
INSTYTUT MASZYN TŁOKOWYCH I TECHNIKI STEROWANIA

## Dokładność pomiarów indykowania silnika spalinowego

Dr inż. Arkadiusz JAMROZIK

Adiunkt w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej. Działalność naukowo-badawcza autora koncentruje się głównie wokół zagadnień związanych z badaniem i modelowaniem procesów spalania w silnikach tłokowych.



e-mail: jamrozik@imitts.pcz.czest.pl

Dr inż. Wojciech TUTAK

Adiunkt w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej. Zainteresowania naukowe to badania eksperymentalne i modelowanie procesów ciepłno-przepływowych w cylindrze silnika tłokowego.



e-mail: tutak@imitts.pcz.czest.pl

Dr inż. Arkadiusz KOCISZEWSKI

Adiunkt w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej. Prace naukowo-badawcze autora koncentrują się przede wszystkim na wykorzystaniu metod numerycznych do optymalizacji procesu spalania w silniku tłokowym oraz przełożeniu wyników symulacji na eksperyment.



e-mail: kocisz@imitts.pcz.czest.pl

### Streszczenie

Wyniki indykowania silnika tłokowego, a w szczególności wyniki analizy procesów termicznych zachodzących w cylindrze silnika są w różnym stopniu uzależnione od dokładności pomiarów oraz niepewność uzyskanego wyniku. Wielkościami charakteryzującymi pracę silnika spalinowego pod względem jego osiągnięć są wskaźniki pracy silnika takie jak: sprawność i ciśnienie indykowane oraz współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej. W pracy przedstawiono analizę błędów pomiarowych i niepewności uzyskanych wyników wyżej wymienionych wielkości podczas indykowania silnika spalinowego o zapłonie iskrowym z komorą wstępną. W wyniku przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że aby można było wiarygodnie interpretować wyniki analizy indykowania tłokowego silnika spalinowego powinny one zawierać wartości błędów i niepewności pomiarowych, gdyż ich wielkość ma znaczący wpływ na końcowy wynik pomiaru. Na podstawie przeprowadzonej analizy błędów i niepewności pomiarowych wyników procesu indykowania silnika spalinowego można stwierdzić, że wyznaczone główne parametry charakteryzujące pracę silnika są obciążone dość znaczącym błędem i niepewnością pomiaru. Błąd pomiaru pracy indykowanej silnika badawczego:  $\delta L_i = 3,1\%$ . Maksymalna wartość niepewności wyznaczenia pracy indykowanej:  $\Delta L_{ii} = 5,5\%$ . Błąd pomiaru sprawności indykowanej silnika badawczego:  $\delta \eta_i = 6\%$ . Maksymalna wartość niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej:  $\Delta \eta_{ii} = 7,8\%$ . Niepewność wyznaczenia współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej silnika:  $\Delta COV_{L_i} = 8,3\%$ . Wydaje się, że aby można było wiarygodnie interpretować wyniki analizy indykowania tłokowego silnika spalinowego powinny one zawierać wartości błędów i niepewności pomiarowych.

**Słowa kluczowe:** indykowanie silnika, ciśnienie indykowane, sprawność indykowana, współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej.

### Measurements accuracy of internal combustion engine indication

#### Abstract

The paper presents the accuracy indication results and thermal process analysis accuracy which occurs in the cylinder of internal combustion engine in particular. The characteristic values of thermal cycle of IC engine are: indicated efficiency, and pressure, and non-repeatability factor of indicated work. The paper presents results of measurement error analysis and uncertainty of above mentioned quantities obtained from indication of spark ignition internal combustion engine with prechamber. The analysis

shows that results of indication of piston engine should include information of measurement accuracy values and uncertainty of calculated quantities. This information has significant influence on final measurement results. Errors are the inseparable part of measurement result. Results without given errors are not complete. The indication of internal combustion engine is currently a standard research method which allows us to find out information on temporary parameters of processes in the cylinder of IC engine. The indication of IC engine is generally considered to be very accurate method with good repeatability of results. On the basis of errors analysis and measurement uncertainty affirmed that main parameters are burdened of quite big errors. Indicated work measurement error of test engine equals  $\delta L_i = 3.1\%$  and indicated work uncertainty  $\Delta L_{ii} = 5.5\%$ . Indicated efficiency measurement error equals  $\delta \eta_i = 6\%$ . The maximum value of indicated efficiency uncertainty equals  $\Delta \eta_{ii} = 7.8\%$ . The maximum value of indication work unrepeatability of this engine equals  $\Delta COV_{L_i} = 8.3\%$ . It seems that to interpretation of analysis results of IC engine indication is necessary to have information on errors and accuracy.

**Keywords:** indication engines, indicated pressure, indicated efficiency, non-repeatability factor of indicated work.

### 1. Wstęp

Pomiary eksperymentalne procesów roboczych silnika spalinowego są źródłem wiedzy pozwalającej na optymalizację i udoskonalenie pracy silnika i mogą prowadzić do ograniczenia emisji szkodliwych składników spalin i zmniejszenia zużycia paliwa. Podstawową, eksperymentalną metodą badań procesów roboczych w cylindrze silnika spalinowego jest indykowanie polegające głównie na pomiarze przebiegu szybkozmiennych, chwilowych zmian ciśnienia w cylindrze silnika. Informacje uzyskane z indykowania cylindra silnika są podstawą do diagnozowania i optymalizacji procesu spalania oraz pozwalają na jakościową ocenę jego pracy. Wyniki indykowania silnika tłokowego, a w szczególności wyniki analizy procesów termicznych zachodzących w cylindrze silnika są w różnym stopniu uzależnione od dokładności pomiarów oraz niepewność uzyskanego wyniku.

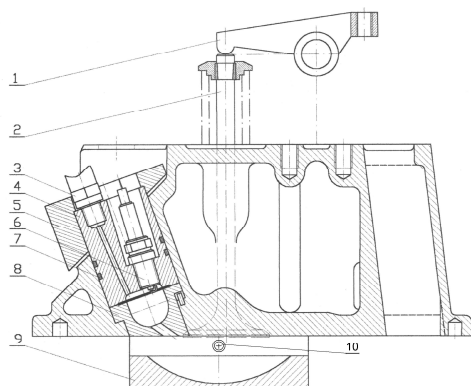
Obecnie produkowane nowoczesne stacjonarne silniki gazowe dużej mocy w celu ograniczenia emisji składników toksycznych oraz poprawy sprawności wykorzystują system dwustopniowego spalania mieszanek ubogich w ramach dzielonej komory spalania. W Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej powstał silnik eksperymentalny z komorą wstępną realizujący dwustopniowy proces spalania.

Silnik powstał na bazie czterosuwowego silnika wysokoprężnego S320ER, wyprodukowanego przez Andrychowską Wytwórnę Silników Wysokoprężnych „ANDORIA”, który po zmianach konstrukcyjnych, dzięki nowemu układowi zasilania oraz wykonaniu instalacji zapłonowej został przystosowany do spalania benzyny jako silnik z zapłonem iskrowym. Dokonane zmiany w konstrukcji głowicy silnika bazowego, umożliwiły realizację systemu spalania dwustopniowego w ramach dzielonej komory spalania. Objętość komory wstępnej stanowiła 4,5% całkowitej objętości nad tłokiem silnika w GMP.

Tab. 1. Podstawowe parametry silnika badawczego

Tab. 1. Main engine parameters

objętość skokowa	1800 cm <sup>3</sup>
liczba cylindrów	1
układ cylindrów	poziomy
promień wykorbienia	80 mm
średnica cylindra	120 mm
długość korbowodu	275 mm
skok tłoka	160 mm
stopień kompresji	8,6
prędkość obrotowa	1000 obr/min



Rys. 1. Głowica silnika badawczego z komorą wstępną

1 – dźwignia zaworowa, 2 – zawór dolotowy, 3 – wygaszcz płomienia, 4 – głowica komory wstępnej, 5 – nakładka ustalająca, 6 – świeca zapłonowa, 7 – pierścień uszczelniający, 8 – korpus komory wstępnej, 9 – tłok, 10 – czujnik ciśnienia

Fig. 1. Test engine head with prechamber

1 - valve rocker, 2 - inlet valve, 3 - flame suppressor, 4 - prechamber body, 5 - retaining cover, 6 - spark plug, 7 - sealing ring, 8 - prechamber, 9 - piston, 10 - pressure sensor

## 2. Metodyka pomiarów na stanowisku badawczym

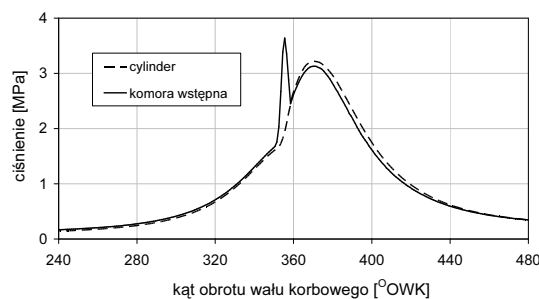
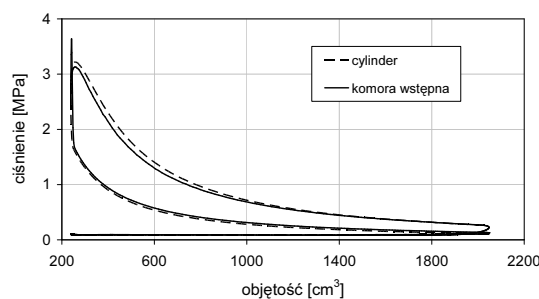
Badania silnika przeprowadzono przy pełnym obciążeniu i stałej prędkości obrotowej 1000 obr/min. Komorę główną silnika zasilano benzyną, a komorę wstępną gazem propan-butan LPG. Badania silnika objęły trzy serie pomiarowe, uwzględniające różny stosunek energii dostarczonej w paliwie do komory wstępnej  $Q_{in}$ , do sumy energii dostarczonej w paliwie do układu dolotowego i do komory  $Q_{cat}$ . Przeprowadzono rejestrację ciśnień występujących w komorach spalania silnika dla  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ , dla  $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$  oraz dla  $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$ , uwzględniając zmianę średniego współczynnika nadmiaru powietrza w zakresie od 1,4 do 2,0 z krokiem 0,2, a także zmianę kąta wyprzedzenia zapłonu w zakresie od  $6^\circ$  do  $18^\circ$  OWK przed ZPP. Rejestracji ciśnień co  $1^\circ$  OWK dokonano dla trzech pomiarów zawierających po 95 kolejnych cykli pracy silnika, przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania [1]. Jednocześnie dokonywano trzykrotnego pomiaru innych wielkości, które są niezbędne do dalszej analizy wyników indykowania programem SILNIK [2], takich jak: prędkość obrotowa, zużycie powietrza, zużycie paliwa ciekłego, zużycie paliwa gazowego, temperatura powietrza, temperatura mieszanki palnej, temperatura paliwa gazowego, temperatura spalin oraz ciśnienie i temperatura otoczenia. Wartość współczynnika nadmiaru powietrza mieszanki palnej mierzono analizatorem spalin Radiotechnika AI 9600 na podstawie tlenu zawartego w spalinach silnika. Dla analizatora zakres pomiaru  $\lambda$  wynosił od 0 do 2, a rozdzielczości pomiaru 0,01.

W pracy przeprowadzono analizę błędów pomiaru pracy indykowanej i sprawności indykowanej. Następnie przeprowadzono analizę niepewności wyznaczenia pracy indykowanej określającą rozrzut (rozproszenie) wokół wartości średniej wyników obliczeń

pracy indykowanej w poszczególnych cyklach z trzech pomiarów zawierających po 95 zarejestrowanych cykli pracy silnika, a także analizę niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej z trzech pomiarów prędkości obrotowej, czasu zużycia benzyny w cylindrze i strumienia objętości propanu-butanu doprowadzane go do komory wstępnej oraz z trzech średnich wartości pracy indykowanej. W pracy dokonano również obliczeń niepewności wyznaczenia współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej określającego niepowtarzalność obiegów silnika badawczego.

## 3. Analiza wyników pomiarów

Charakterystyki sporządzone na podstawie analizy wyników pomiarów przeprowadzonych na stanowisku badawczym pokazują, że udział energetyczny paliwa wzbogacającego mieszankę palną w komorze wstępnej silnika z dwustopniowym systemem spalania, ma wpływ na pracę i sprawność indykowaną, a także na stabilność pracy i niepowtarzalność obiegów silnika. Spośród trzech analizowanych wartości ładunku wzbogacającego: 8%, 5% i 2,5%, najbardziej korzystne pod tym względem warunki pracy osiągnięto dla przypadku, w którym stosunek energii zawartej w paliwie dostarczonej do komory wstępnej  $Q_{in}$ , do energii doprowadzonej do całego silnika  $Q_{cat}$  był najmniejszy i wynosił 2,5%.

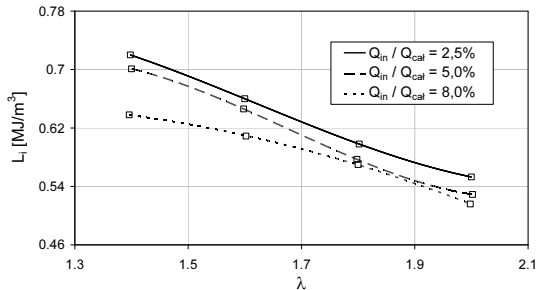
Rys. 2. Ciśnienie w cylindrze i komorze wstępnej w funkcji kąta OWK dla  $\lambda = 2,0$ ,  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$  i  $L_i = 0,55 \text{ MJ/m}^3$ Fig. 2. Pressure in cylinder and prechamber versus crank angle for  $\lambda = 2,0$ ,  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$  and  $L_i = 0,55 \text{ MJ/m}^3$ Rys. 3. Wykres indykatorowy p-V cylindra i komory wstępnej dla  $\lambda = 2,0$ ,  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$  i  $L_i = 0,55 \text{ MJ/m}^3$ Fig. 3. Indicator diagram p-V of cylinder and prechamber for  $\lambda = 2,0$ ,  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$  and  $L_i = 0,55 \text{ MJ/m}^3$ 

Jednym z wskaźników charakteryzujących pracę silnika spalnikowego pod względem jego osiągnięć jest praca indykowana  $L_i$  (jednostkowa) wyrażona w  $\text{MJ/m}^3$ , równa liczbowo średniemu ciśnieniu indykowanemu w MPa.

$$L_i = \frac{\sum_{n=0}^{720} \frac{p_n + p_{n+1}}{2} (V_{n+1} - V_n)}{V_s}, \quad (1)$$

gdzie:  $p_n, p_{n+1}$  - chwilowe wartości ciśnienia w cylindrze [MPa],  
 $V_n, V_{n+1}$  - chwilowe wartości pojemność cylindra [m<sup>3</sup>],  
 $V_s$  - pojemność skokowa [m<sup>3</sup>].

Dla  $Q_{in}/Q_{cal} = 2,5\%$ , praca indykowana malejąc ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza zawierała się w przedziale od 0,72 do 0,55 MJ/m<sup>3</sup>.



Rys. 4. Praca indykowana w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza  
 Fig. 4. Indicated work versus excess air factor

Z praktycznymi pomiarami wielkości fizycznych nierozzerwalnie związany jest błąd pomiaru oraz niepewność uzyskanego wyniku.

Na błąd pomiaru pracy indykowanej składa się błąd pomiaru ciśnienia w cylindrze silnika oraz błąd pomiaru przyrostu chwilowej pojemności cylindra. Błąd pomiaru pracy indykowanej można wyznaczyć z zależności [3]:

$$\delta L_i = \sqrt{\delta p^2 + \delta V^2}, \quad (2)$$

gdzie:  $\delta p$  - błąd pomiaru ciśnienia w cylindrze [%],  $\delta V$  - błąd pomiaru przyrostu chwilowej pojemności cylindra [%].

Błąd pomiaru ciśnienia jest sumą błędów piezokwarcowego czujnika ciśnienia, błędów wzmacniacza oraz błędów karty pomiarowej z przetwornikiem a/c.

$$\delta p = \sqrt{\delta cz^2 + \delta w^2 + \delta(a/c)^2}, \quad (3)$$

$$\delta cz = 0,5\% [4],$$

$$\delta w = 3\% [5],$$

gdzie:  $\delta cz$  - błąd piezokwarcowego czujnika ciśnienia [%],  
 $\delta w$  - błąd wzmacniacza [%],  $\delta(a/c)$  - błąd karty pomiarowej [%].

Błąd karty pomiarowej jest błędem kwantowania przetwornika a/c o zakresie przetwarzania  $\pm 10V$  i rozdzielczości 12 bitów [6]:

$$\delta(a/c) = \frac{\theta}{FSR} 100\%, \quad (4)$$

$$\theta = \frac{FSR}{2^r},$$

$$\delta(a/c) = 0,024\%,$$

gdzie:  $\theta$  - przedział kwantowania przetwornika a/c [V],  
 $FSR$  - zakres przetwarzania przetwornika a/c [V],  $r$  - rozdzielczość przetwornika a/c.

Błąd pomiaru przyrostu chwilowej pojemności cylindra jest sumą błędów wskazań znacznika kąta obrotu wału korbowego oraz błędów karty pomiarowej z przetwornikiem a/c.

$$\delta V = \sqrt{\delta k^2 + \delta(a/c)^2}, \quad (5)$$

gdzie:  $\delta k$  - błąd znacznika kąta obrotu wału korbowego [%],  
 $\delta(a/c)$  - błąd karty pomiarowej [%].

Błąd znacznika kąta obrotu wału korbowego obliczono przy prostokątym położeniu korbowodu względem ramienia wykorbienia wału korbowego, jako stosunek zmiany pojemności cylindra, odpowiadający 0,5<sup>0</sup> OWK, czyli połowie wartości kroku kąтового znacznika, do pojemności skokowej cylindra.

$$\delta k = \frac{\Delta V}{V_s} 100\% = 0,45\%, \quad (6)$$

gdzie:  $\Delta V$  - zmiana pojemności cylindra odpowiadająca czasowi trwania impulsu przebiegu prostokątnego znacznika kąta obrotu wału korbowego [m<sup>3</sup>].

Błąd karty pomiarowej (4):

$$\delta(a/c) = 0,024\%.$$

Według zależności (2) błąd pomiaru pracy indykowanej wynosi  $\delta L_i \approx 3,1\%$ .

Przyjęto, że niepewność wyznaczenia pracy indykowanej, określająca rozrzut (rozproszenie) wokół wartości średniej wyników obliczeń pracy indykowanej w poszczególnych cyklach z trzech pomiarów zawierających po 95 zarejestrowanych cykli pracy silnika ma rozkład normalny i obliczono ją z zależności [3]:

$$\Delta L_{ii} = t_s \sigma_{L_{ii}}, \quad (7)$$

gdzie:  $t_s$  - współczynnik rozkładu t-Studenta dla  $N-1$  stopni swobody i dla przyjmowanego najczęściej w technice 95% poziomu ufności,  $N$  - liczba pomiarów.

Odchylenie standardowe pracy indykowanej:

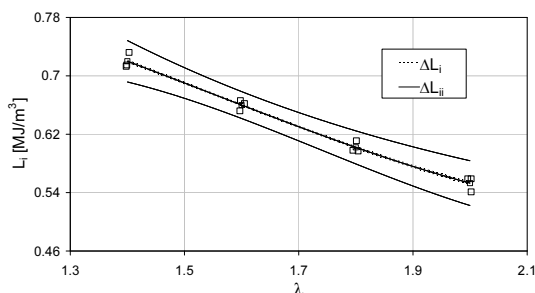
$$\sigma_{L_{ii}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (L_{ii} - L_i)^2}, \quad (8)$$

gdzie:  $N$  - liczba pomiarów,  $L_{ii}$  - wartości pracy indykowanej w poszczególnych cyklach [MJ/m<sup>3</sup>],  $L_i$  - średnia wartość pracy indykowanej z trzech pomiarów zawierających po 95 zarejestrowanych cykli pracy silnika [MJ/m<sup>3</sup>].

Dokładność wyznaczenia wartości średniej określonej wielkości jest uzależniona od liczby przeprowadzonych pomiarów i nazywana jest niepewnością graniczną wartości średniej. Dla pracy indykowanej niepewność wyznaczenia wartości średniej obliczono z zależności [3]:

$$\Delta L_i = t_s \frac{\sigma_{L_{ii}}}{\sqrt{N}}. \quad (9)$$

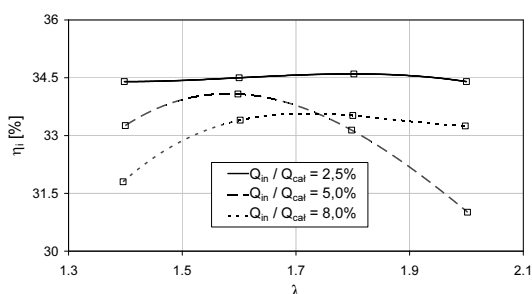
Na rys. 5 przedstawiono przedziały niepewności wyznaczenia pracy indykowanej  $\pm \Delta L_{ii}$  oraz niepewności wyznaczenia wartości średniej pracy indykowanej  $\pm \Delta L_i$ , naniesione na charakterystyce zmian średniej wartości  $L_i$  w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza, dla  $Q_{in}/Q_{cal} = 2,5\%$ . Wartość niepewności  $\pm \Delta L_{ii}$  mieściła się w granicach od  $\pm 0,02$  MPa dla  $\lambda = 1,6$ , co stanowi 2,8% średniej wartości pracy indykowanej, do  $\pm 0,03$  MPa dla  $\lambda = 2,0$ , co stanowi 5,5% wartości  $L_i$ . Wartość niepewności  $\pm \Delta L_i$  zawierała się w przedziale od  $\pm 0,001$  MPa dla  $\lambda = 1,6$ , co stanowi 0,17% średniej wartości pracy indykowanej, do  $\pm 0,002$  MPa dla  $\lambda = 2,0$ , co stanowi 0,33% wartości  $L_i$ .



Rys. 5. Praca indykowana oraz przedziały niepewności wyznaczenia pracy indykowanej  $\Delta L_i$  i jej wartości średniej  $\Delta L_i$  dla  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$

Fig. 5. Indicated work with uncertainty ranges determination indicated work  $\Delta L_i$  and its average value  $\Delta L_i$  for  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$

Najwyższą sprawność indykowaną  $\eta_i$  silnik badawczy osiągnął, kiedy udział paliwa wzbogacającego mieszankę w komorze wstępnej wynosił 2,5%. Dla całego zakresu składu mieszanki palnej  $\eta_i$  utrzymywała się na prawie stałym poziomie - 34,5%.



Rys. 6. Sprawność indykowana w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza

Fig. 6. Indicated efficiency versus excess air factor

Sprawność indykowana jest stosunkiem pracy indykowanej wykonanej w cyklu pracy silnika do ciepła doprowadzonego do silnika w tym cyklu. W czasie badań pomiar ciepła doprowadzonego w pojedynczym cyklu nie był możliwy ponieważ mierzono ilość ciepła sumaryczną doprowadzoną w czasie kilkuset cykli (około 500). Sprawność indykowaną określono jako stosunek pracy indykowanej uśrednionej w czasie trwania pomiaru zużycia paliwa do średniej ilości ciepła. Praca indykowana jest iloczynem pracy indykowanej i pojemności skokowej cylindra. Błąd pomiaru średniej sprawności indykowanej jest więc sumą błędów pomiaru średniej pracy indykowanej i błędów pomiaru całkowitego ciepła dostarczonego do silnika.

Średnia wartość sprawności indykowanej wyrażona w % wynosi:

$$\eta_i = \frac{L_i V_s}{Q_{cat}} 100\%,$$

$$\eta_i = \frac{L_i V_s}{Q_{cyl} + Q_{in}} 100\%, \quad (10)$$

gdzie:  $Q_{cat}$  - całkowite ciepło dostarczone do silnika [MJ],  $Q_{cyl}$  - ciepło dostarczone do cylindra silnika [MJ],  $Q_{in}$  - ciepło dostarczone do komory wstępnej [MJ].

Błąd pomiaru średniej wartości sprawności indykowanej:

$$\delta\eta_i = \sqrt{\delta L_i^2 + \delta Q_{cat}^2},$$

$$\delta Q_{cat} = \sqrt{\delta Q_{cyl}^2 + \delta Q_{in}^2}, \quad \frac{\delta Q_{cat}}{Q_{cat}} = \sqrt{\left(\frac{\delta Q_{cyl}}{Q_{cat}}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_{in}}{Q_{cat}}\right)^2},$$

$$\frac{\delta Q_{cat}}{Q_{cat}} = \sqrt{\left(\frac{\delta Q_{cyl}}{Q_{cyl} + Q_{in}} \frac{Q_{cyl}}{Q_{cyl}}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_{in}}{Q_{cyl} + Q_{in}} \frac{Q_{in}}{Q_{in}}\right)^2},$$

$$\delta Q_{cat} = \sqrt{\left(\frac{Q_{cyl}}{Q_{cyl} + Q_{in}}\right)^2 \delta Q_{cyl}^2 + \left(\frac{Q_{in}}{Q_{cyl} + Q_{in}}\right)^2 \delta Q_{in}^2},$$

$$\delta\eta_i = \sqrt{\delta L_i^2 + \left(\frac{Q_{cyl}}{Q_{cyl} + Q_{in}}\right)^2 \delta Q_{cyl}^2 + \left(\frac{Q_{in}}{Q_{cyl} + Q_{in}}\right)^2 \delta Q_{in}^2}, \quad (11)$$

gdzie:  $\delta L_i$  - błąd pomiaru pracy indykowanej [%],  $\delta Q_{cat}$  - błąd pomiaru całkowitego ciepła dostarczonego do silnika [%],  $\delta Q_{cyl}$  - błąd pomiaru ciepła dostarczonego do cylindra silnika [%],  $\delta Q_{in}$  - błąd pomiaru ciepła dostarczonego do komory wstępnej [%].

Błąd pomiaru pracy indykowanej (2):

$$\delta L_i = 3,1\%.$$

Ciepło dostarczone do cylindra silnika:

$$Q_{cyl} = \frac{V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben}}{0,5 n t}, \quad (12)$$

gdzie:  $V_{cyl}$  - objętość benzyny doprowadzonej do cylindra silnika [m<sup>3</sup>],  $\rho_{ben}$  - gęstość benzyny [kg/m<sup>3</sup>],  $W_{ben}$  - wartość opałowa benzyny [MJ/kg],  $n$  - prędkość obrotowa silnika [1/min],  $t$  - czas zużycia benzyny doprowadzonej do cylindra silnika [min].

Błąd pomiaru ciepła dostarczonego do cylindra silnika:

$$\delta Q_{cyl} = \sqrt{\delta V_{cyl}^2 + \delta \rho_{ben}^2 + \delta W_{ben}^2 + \delta n^2 + \delta t^2}, \quad (13)$$

gdzie:  $\delta V_{cyl}$  - błąd pomiaru objętości benzyny doprowadzonej do cylindra silnika [%],  $\delta \rho_{ben}$  - szacunkowy błąd gęstości benzyny [%],  $\delta W_{ben}$  - szacunkowy błąd wartości opałowej benzyny [%],  $\delta n$  - błąd pomiaru prędkości obrotowej silnika [%],  $\delta t$  - błąd pomiaru czasu zużycia benzyny w cylindrze silnika [%].

Błąd pomiaru objętości benzyny doprowadzonej do cylindra silnika wyrażono w % i obliczono jako stosunek działki elementarnej miernicy objętościowej paliwa do wartości zmierzonej objętości benzyny:

$$\delta V_{cyl} = \frac{dz_{elem}}{V_{cyl}} 100\% = 2,5\%. \quad (14)$$

Szacunkowy błąd gęstości benzyny [7]:

$$\delta \rho_{ben} = 4,8\%.$$

Szacunkowy błąd wartości opałowej benzyny [8]:

$$\delta W_{ben} = 1\%.$$

Błąd pomiaru prędkości obrotowej silnika wyrażono w % i obliczono jako stosunek działki elementarnej układu pomiaru prędkości obrotowej do jej wartości zmierzonej:

$$\delta n = \frac{dz_{elem}}{n} 100\% = 0,1\%. \quad (15)$$

Błąd pomiaru czasu zużycia benzyny w cylindrze silnika wyrażono w % i obliczono jako stosunek działki elementarnej stopera do wartości zmierzonego czasu:

$$\delta t = \frac{dz_{elem}}{t} \cdot 100\% = 0,2\% . \quad (16)$$

Ciepło dostarczone do komory wstępnej silnika:

$$Q_{in} = \frac{\dot{V}_{in} \rho_{LPG} W_{LPG}}{0,5 n} , \quad (17)$$

gdzie:  $\dot{V}_{in}$  - strumień objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej [ $m^3/min$ ],  $\rho_{LPG}$  - gęstość propanu-butanu [ $kg/m^3$ ],  $W_{LPG}$  - wartość opałowa propanu-butanu [ $MJ/kg$ ].

Błąd pomiaru ciepła dostarczonego do komory wstępnej silnika:

$$\delta Q_{in} = \sqrt{\delta \dot{V}_{in}^2 + \delta \rho_{LPG}^2 + \delta W_{LPG}^2 + \delta n^2} , \quad (18)$$

gdzie:  $\delta \dot{V}_{in}$  - błąd pomiaru strumienia objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej [%],  $\delta \rho_{LPG}$  - szacunkowy błąd gęstości propanu-butanu [%],  $\delta W_{LPG}$  - szacunkowy błąd wartości opałowej propanu-butanu [%].

Błąd pomiaru strumienia objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej silnika wyrażono w % i obliczono jako stosunek działki elementarnej rotametry gazowego do wartości zmierzonej strumienia objętości gazu:

$$\delta \dot{V}_{in} = \frac{dz_{elem}}{\dot{V}_{in}} \cdot 100\% = 5\% \quad (19)$$

Szacunkowy błąd gęstości propanu-butanu [9]:

$$\delta \rho_{LPG} = 6,8\% .$$

Szacunkowy błąd wartości opałowej propanu-butanu [9]:

$$\delta W_{LPG} = 1,8\% .$$

Błąd pomiaru prędkości obrotowej silnika (15):

$$\delta n = 0,1\%$$

Według zależności (11) błąd pomiaru średniej sprawności indykowanej wynosi  $\delta \eta_i \approx 6\%$ .

Na wartość niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej ma wpływ niepewność wyznaczenia pracy indykowanej, prędkości obrotowej, czasu zużycia benzyny w cylindrze silnika oraz strumienia objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej. Niepewność wyznaczenia sprawności indykowanej określono z trzech pomiarów prędkości obrotowej, czasu zużycia benzyny w cylindrze silnika i strumienia objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej oraz z trzech średnich wartości pracy indykowanej.

Niepewność wyznaczenia sprawności indykowanej obliczono z zależności [3]:

$$\Delta \eta_{ii} = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_i}{\partial L_i} \Delta L_{ii}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial n} \Delta n_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial t} \Delta t_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial \dot{V}_{in}} \Delta \dot{V}_{in_i}\right)^2} , \quad (20)$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial L_i} = \frac{0,5 V_s n t}{\left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right)} ,$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial n} = \frac{0,5 L_i V_s t}{\left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right)} ,$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial t} = \frac{0,5 L_i V_s n \left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right) - 0,5 L_i V_s n t \dot{V}_{in} W_{LPG}}{\left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right)^2} ,$$

$$\frac{\partial \eta_i}{\partial \dot{V}_{in}} = \frac{-0,5 L_i V_s n t^2 W_{LPG}}{\left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right)^2} .$$

Niepewność wyznaczenia prędkości obrotowej silnika:

$$\Delta n_i = t_s \sigma_{ni} , \quad (21)$$

gdzie:  $\sigma_{ni}$  - odchylenie standardowe pomiaru prędkości obrotowej silnika [1/min].

Niepewność wyznaczenia czasu zużycia benzyny w cylindrze silnika:

$$\Delta t_i = t_s \sigma_{ti} , \quad (22)$$

gdzie:  $\sigma_{ti}$  - odchylenie standardowe wartości czasu zużycia dawki benzyny [min].

Niepewność wyznaczenia strumienia objętości propanu-butanu dostarczonego do komory wstępnej silnika:

$$\Delta \dot{V}_{in_i} = t_s \sigma_{\dot{V}_{in_i}} , \quad (23)$$

gdzie:  $\sigma_{\dot{V}_{in_i}}$  - odchylenie standardowe wartości strumienia objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej [ $m^3/min$ ].

Niepewność wyznaczenia wartości średniej sprawności indykowanej obliczono z zależności [3]:

$$\Delta \eta_i = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_i}{\partial L_i} \Delta L_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial n} \Delta n_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial t} \Delta t_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial \dot{V}_{in}} \Delta \dot{V}_{in_i}\right)^2} . \quad (24)$$

Niepewność wyznaczenia wartości średniej pracy indykowanej:

$$\Delta L_i = t_s \frac{\sigma_{L_{ii}}}{\sqrt{3}} . \quad (25)$$

Niepewność wyznaczenia wartości średniej prędkości obrotowej silnika:

$$\Delta n = t_s \frac{\sigma_{ni}}{\sqrt{3}} . \quad (26)$$

Niepewność wyznaczenia wartości średniej i czasu zużycia benzyny:

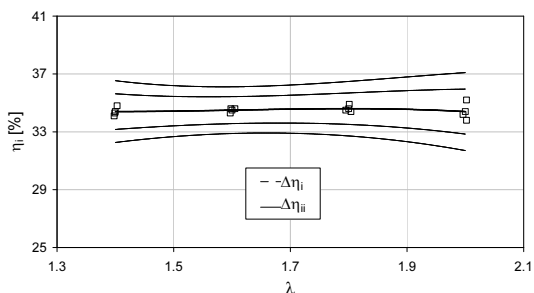
$$\Delta t = t_s \frac{\sigma_{ti}}{\sqrt{3}} . \quad (27)$$

Niepewność wyznaczenia wartości średniej strumienia objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej silnika:

$$\Delta \dot{V}_{in} = t_s \frac{\sigma_{\dot{V}_{in_i}}}{\sqrt{3}} . \quad (28)$$

Na rys. 7 przedstawiono przedziały niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej  $\pm \Delta \eta_{ii}$  oraz niepewności wyznaczenia wartości średniej sprawności indykowanej  $\pm \Delta \eta_i$ , naniesione na charakterystyce zmian średniej wartości  $\eta_i$  w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza, dla  $Q_{in}/Q_{cal} = 2,5\%$ . Wartość niepewno-

ści  $\pm\Delta\eta_{ii}$  mieściła się w granicach od  $\pm 1,6\%$  dla  $\lambda = 1,6$ , co stanowi  $4,7\%$  średniej wartości sprawności indykowanej, do  $\pm 2,7\%$  dla  $\lambda = 2,0$ , co stanowi  $7,8\%$  wartości  $\eta_i$ . Wartość niepewności  $\pm\Delta\eta_i$  zawierała się w przedziale od  $\pm 0,9\%$  dla  $\lambda = 1,6$ , co stanowi  $2,7\%$  wartości  $\eta_i$ , do  $\pm 1,6\%$  dla  $\lambda = 2,0$ , co stanowi  $4,5\%$  wartości średniej  $\eta_i$ .



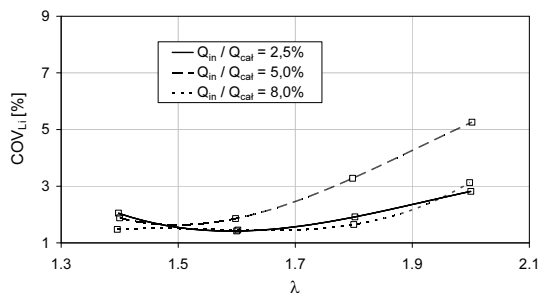
Rys. 7. Sprawność indykowana oraz przedziały niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej  $\Delta\eta_{ii}$  i jej wartości średniej  $\Delta\eta_i$  dla  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$   
Fig. 7. Indicated efficiency with uncertainty ranges determination indicated efficiency  $\Delta\eta_{ii}$  and its average value  $\Delta\eta_i$  for  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$

Jednym z podstawowych kryteriów oceny poprawności działania silnika spalinowego jest niepowtarzalność obiegów jego pracy. Jako miarę niepowtarzalności obiegu silnika przyjęto współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej  $COV_{Li}$ , wyrażony w % i obliczany jako stosunek odchylenia standardowego pracy indykowanej silnika do jej wartości średniej, z trzech pomiarów zawierających po 95 zarejestrowanych cykli pracy silnika.

$$COV_{Li} = \frac{\sigma_{Li}}{L_i} 100\%. \quad (29)$$

Praca silnika konwencjonalnego realizującego jednostopniowy system spalania zasilanego mieszkanką homogeniczną, w zakresie wysokich wartości  $\lambda$ , wiąże się z pogorszeniem stabilności jego pracy objawiającym się znaczną niepowtarzalnością kolejnych cykli oraz wypadaniem zapłonów. Według literatury [10], granica poprawnej pracy silnika spalinowego, wyrażona maksymalną wartością współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej  $COV_{Li}$ , wynosi 10%.

Najmniejszą wartości współczynnika  $COV_{Li}$ , wynoszącą 1,45% dla  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$  uzyskano przy  $\lambda$  równym około 1,6.



Rys. 8. Współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza  
Fig. 8. Non-repeatability factor of indicated work versus excess air factor

Przyjęto, że niepewność wyznaczenia współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej  $COV_{Li}$  ma rozkład normalny i obliczono ją z zależności [3]:

$$\Delta COV_{Li} = t_s \sigma_{COV_{Li}}, \quad (30)$$

gdzie:  $\sigma_{COV_{Li}}$  - odchylenie standardowe wartości współczynnika  $COV_{Li}$  [%].

Na wartość odchylenia standardowego współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej  $COV_{Li}$  składa się niepewność wyznaczenia odchylenia standardowego pracy indykowanej  $\sigma_{Li}$  oraz niepewność wyznaczenia średniej wartości pracy indykowanej  $L_i$ .

Odchylenie standardowe wartości współczynnika  $COV_{Li}$  obliczono wykorzystując zależność na wariancję funkcji dwóch zmiennych [11]:

$$\sigma_{COV_{Li}}^2 = \left( \frac{\partial COV_{Li}}{\partial \sigma_{Li}} \right)^2 \sigma_{\sigma_{Li}}^2 + \left( \frac{\partial COV_{Li}}{\partial L_i} \right)^2 \sigma_{L_i}^2, \quad (31)$$

gdzie:  $\sigma_{\sigma_{Li}}$  - odchylenie standardowe odchylenia standardowego pracy indykowanej [MJ/m<sup>3</sup>],  $\sigma_{L_i}$  - odchylenie standardowe wartości średniej pracy indykowanej [MJ/m<sup>3</sup>].

Po zróżniczkowaniu, odchylenie standardowe wartości współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej  $COV_{Li}$  wynosi:

$$\sigma_{COV_{Li}} = 100\% \sqrt{\left( \frac{1}{L_i} \right)^2 \sigma_{\sigma_{Li}}^2 + \left( -\frac{\sigma_{Li}}{L_i^2} \right)^2 \sigma_{L_i}^2}, \quad (32)$$

Odchylenie standardowe odchylenia standardowego pracy indykowanej (względna niepewność  $\sigma_{\sigma_{Li}}$ ) wynosi [3]:

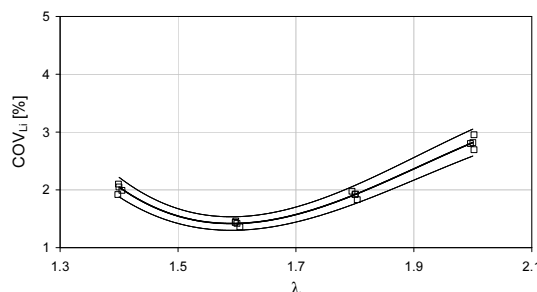
$$\sigma_{\sigma_{Li}} = \sigma_{Li} \frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}, \quad (33)$$

Odchylenie standardowe wartości średniej pracy indykowanej:

$$\sigma_{L_i} = \frac{\sigma_{Li}}{\sqrt{N}}. \quad (34)$$

Niepewność wyznaczenia współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej będzie maleć ze wzrostem liczby pomiarów  $N$ . Im więcej powtórzeń pomiarów tym  $\sigma_{\sigma_{Li}}$  oraz  $\sigma_{L_i}$  będą mniejsze i bardziej wiarygodne, a tym samym niepewność określenia współczynnika  $COV_{Li}$  będzie mniejsza.

Na rys. 9 przedstawiono przedziały niepewności wyznaczenia wartości współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej  $\pm\Delta COV_{Li}$ , naniesione na charakterystyce zmian  $COV_{Li}$  w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza, dla  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$ . Dla całego zakresu  $\lambda$  wartość niepewności  $\pm\Delta COV_{Li}$  stanowiła 8,3% wartości współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej  $COV_{Li}$  i mieściła się w granicach od  $\pm 0,12\%$  dla  $\lambda = 1,6$  do  $\pm 0,23\%$  dla  $\lambda = 2,0$ .



Rys. 9. Współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej  $COV_{Li}$  oraz przedziały niepewności wyznaczenia współczynnika  $COV_{Li}$  dla  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$   
Fig. 9. Non-repeatability factor of indicated work  $COV_{Li}$  with uncertainty ranges determination  $COV_{Li}$  for  $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$

#### 4. Podsumowanie

Jak wykazuje praktyka, żaden pomiar, niezależnie od staranności jego wykonania nie daje całkowicie dokładnego wyniku. Błąd o znanych granicach jest nieodłączną częścią wyniku pomiaru, a wynik pomiaru, którego błędy nie są znane jest wynikiem nic nie mówiącym.

Indykowanie silnika spalinowego jest obecnie standardową metodą badawczą stosowaną w dziedzinie tłokowych silników spalinowych, pozwalającą na rejestrację chwilowych wartości parametrów procesów zachodzących w cylindrze silnika i umożliwiającą analizę wpływu różnych czynników na ich przebieg. Powszechna opinia o precyzji wykorzystywanych podczas indykowania systemów komputerowych oraz czujników pomiarowych prowadzi do przekonania, że indykowanie jest bardzo dokładną, wiarygodną i powtarzalną procedurą badawczą oraz, że spełnia wymagania stawiane w zakresie dokładności pomiarów i umożliwia otrzymanie istotnych wielkości oceniających pracę silnika [12].

Na podstawie przeprowadzonej analizy błędów i niepewności pomiarowych wyników procesu indykowania silnika spalinowego można stwierdzić, że wyznaczone główne parametry charakteryzujące prace silnika są obciążone dość znacznym błędem i niepewnością pomiaru. Błąd pomiaru pracy indykowanej silnika badawczego:  $\delta L_i = 3,1\%$ . Maksymalna wartość niepewności wyznaczenia pracy indykowanej:  $\Delta L_{ii} = 5,5\%$ . Błąd pomiaru sprawności indykowanej silnika badawczego:  $\delta \eta_i = 6\%$ . Maksymalna wartość niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej:  $\Delta \eta_{ii} = 7,8\%$ . Niepewność wyznaczenia współczynnika niepowtarzalność pracy indykowanej silnika:  $\Delta COV_{L_i} = 8,3\%$

Wydaje się, że aby można było wiarygodnie interpretować wyniki analizy indykowania tłokowego silnika spalinowego powinny one zawierać wartości błędów i niepewności pomiarowych, a wykreślone charakterystyki zmian wyników pomiarów powinny być uzupełniane o słupki błędów lub pola niepewności pomiarowych.

#### 5. Literatura

- [1] Gruca M.: LCTXR – program do rejestracji i analizy sygnałów. Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, Częstochowa 2001.
- [2] Cupiał K.: SILNIK – wersja 2001.5 – program do opracowywania wykresów indykatorowych. Instytut Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania, Częstochowa 2002.
- [3] Taylor J.R.: Wstęp do analizy błęd pomiarowego. PWN Warszawa 1995.
- [4] Kistler - Instruction Manual Water-Cooled ThermoCOMP Pressure Sensors. Type 7061B, 7063A, 6061B, 6067C1, 6041A, 6043A.
- [5] <http://www.kistler.com/>.
- [6] AMBEX – Instrukcja karty LC-020-0812. 1995.
- [7] Norma PN-C-96025: Przetwory naftowe. Benzyny silnikowe. Benzyny etylizowane. 1999.
- [8] Golec K., Stępień Z.: Paliwa i oleje silnikowe. Skrypt dla studentów wyższych szkół technicznych. Politechnika Krakowska, 1993.
- [9] Jakóbiec J., Janik R., Gardyński L.: Wpływ pakietu dodatku uszlachetniającego na właściwości fizykochemiczne i użytkowe „auto-gazu”. VI Międzynarodowa Konferencja Naukowa – Silniki Gazowe 2003. Konstrukcja - Badania - Eksploatacja - Paliwa odnawialne, 2003.
- [10] Heywood J.B.: Internal combustion engine fundamentals. McGraw – Hill Book Company 1988.
- [11] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT Warszawa 1973.
- [12] Ambrozik A., Kurczyński D.: Analiza szybkości szybkozmiennych silnika AD3.152 UR zasilanego paliwem mineralnym, paliwem pochodzenia roślinnego i ich mieszaninami. MOTROL, 10 11-22.2008.
- [13] Cupiał K., Dużyński A., Gruca M., Grzelka J.: Some errors of gas engine indication. Journal of Kones, Combustion Engines, Vol 8, No 1-2, 2001.

otrzymano / received: 30.04.2009

przyjęto do druku / accepted: 10.11.2009

artykuł recenzowany

#### INFORMACJE

### Cennik publikacji reklam w miesięczniku naukowo-technicznym PAK

REKLAMA	w skali odcieni szarości [ceny netto]	kolor [ceny netto]
I okładka (212(s) x 213(w) mm)	-	<b>1 800,00</b>
II okładka (212x301 mm)	-	<b>1 600,00</b>
III okładka (212x301 mm)	-	<b>1 500,00</b>
IV okładka (212x301 mm)	-	<b>1 700,00</b>
1 strona (200x297 mm)	<b>900,00</b>	<b>1 100,00</b>
½ strony (200x145mm) - pozioma	<b>500,00</b>	<b>700,00</b>

Reklamę należy przygotować zgodnie z obowiązującymi wytycznymi znajdującymi się na stronie internetowej: [www.pak.info.pl](http://www.pak.info.pl)