

INDICATION ERRORS OF ENGINE WITH TWO STAGE COMBUSTION SYSTEM

Arkadiusz Jamrozik, Arkadiusz Kociszewski, Wojciech Tutak

Czestochowa University of Technology
Institute of Internal Combustion Engines and Control Engineering
Armii Krajowej Av. 21, 42-200 Czestochowa, Poland
tel.: +48 34 3250543, tel./fax: +48 34 3250507
e-mail: jamrozik@ imtits.pcz.czest.pl
kocisz@imtits.pcz.czest.pl, tutak@ imtits.pcz.czest.pl

Abstract

Paper presents indication results accuracy and accuracy of thermal processes analysis 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. Paper presents results of measuring errors 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 included information of measurement accuracy values and uncertainty of calculated quantities. This information has significant influence on final measurement results.

No measurement, regardless of accuracy of its realization does not give absolutely exact result. The error of well-known limits is a part and parcel of the measurement result and the result of the measurement whose errors are not well-known results nothing referring. Indication of a combustion engine is at present standard- investigative practical method in the sphere of piston-combustion engines, allowing on the transient values registration of parameters processes occurring in the cylinder of the engine and making possible analysis of the influence of different factors on their courses.

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

BŁĘDY INDYKOWANIA SILNIKA ZI Z DWUSTOPNIOWYM SYSTEMEM SPALANIA

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.

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 niemówiącym.

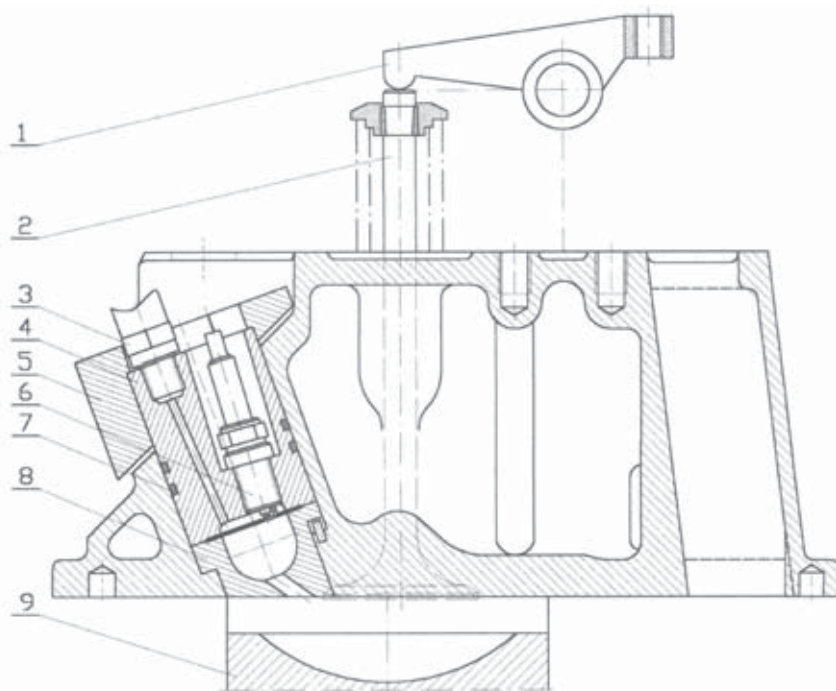
Słowa kluczowe: *indykowanie silnika, ciśnienie indykowane, sprawność indykowana, współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej*

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 systemie tym komora spalania składa się z dwóch części: głównej komory w cylindrze silnika i połączonej z nią odpowiednim kanałem komory wstępnej, umieszczonej w głowicy. Do cylindra zasysana jest mieszanka bardzo uboga ($\lambda = 1,5 \div 3,0$), wytworzona w układzie dolotowym silnika, natomiast do komory wstępnej, dostarczane jest mieszanka bogata o składzie stechiometrycznym ($\lambda = 1,0$). W komorze wstępnej następuje zapłon za pomocą wyładowania iskrowego i ulega zapłonowi bogata mieszanka. W wyniku wzrostu ciśnienia, paląca się zawartość komory wstępnej, zostaje przez kanał łączący wtłoczona do właściwej komory spalania w cylindrze. W tej ostatniej powstaje bardzo wiele przemieszczających się ognisk zapłonu. W wyniku tego uboga mieszanka palna, która normalnie nie uległaby zapłonowi od iskry elektrycznej, zapalona w wielu miejscach, spala się dostatecznie szybko, aby zapewnić dużą sprawność obiegu i uniknąć niedogodności związanych z dopalaniem paliwa podczas suwu rozprężania.



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

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

Silnik badawczy 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 ³
liczba cylindrów	1
układ cylindrów	poziomy
promień wykorbienia	80 mm
średnica cylindra	120 mm
długość korbowodu	275 mm
skok tłoka	160 mm
stopień sprężania	8,6
prędkość obrotowa	1000 obr/min

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 $Q_{cał}$. Przeprowadzono rejestrację ciśnień występujących w komorach spalania silnika dla $Q_{in}/Q_{cał} = 2,5\%$, dla $Q_{in}/Q_{cał} = 5\%$ oraz dla $Q_{in}/Q_{cał} = 8\%$, 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° do 18° OWK przed ZZP. Rejestracji ciśnień co 1° 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.

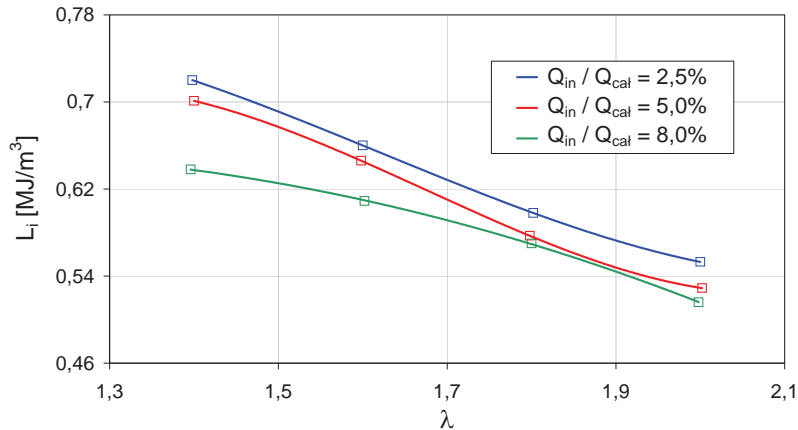
W pracy przeprowadzono analizę błędu pomiaru pracy indykowanej i sprawności indykowanej. Następnie przeprowadzono analizę niepewności wyznaczenia pracy indykowanej określającą rozrzut (rozproszenie) wokół wartości średniej wyników obliczeń pracy indykowanej w poszczególnych cyklach z trzech pomiarów 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 doprowadzanego 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

Jednym z wskaźników charakteryzujących pracę silnika spalinowego pod względem jego osiągnięć jest praca indykowana L_i w MJ/m³, równa liczbowo średniemu ciśnieniu indykowanemu w MPa. Wykresy sporządzone na podstawie analizy wyników pomiarów pokazują, że zmiana

udziału energetycznego paliwa doprowadzanego do komory wstępnej Q_{in} w całkowitej ilości energii $Q_{cał}$ doprowadzonej w paliwie, miała znaczący wpływ na pracę i sprawność indykowaną silnika badawczego.

W przypadku, kiedy udział ten był najmniejszy i wynosił 2,5%, L_i malejąc ze wzrostem współczynnika nadmiaru powietrza zawierała się w przedziale od 0,72 do 0,55 MJ/m³. Dla $Q_{in}/Q_{cał} = 5\%$ przy podobnym spadku ze wzrostem λ przedział ten wynosił od 0,7 do 0,53 MJ/m³, a dla $Q_{in}/Q_{cał} = 8\%$ od 0,64 do 0,52 MJ/m³.



Rys. 2. Praca indykowana w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza
Fig. 2. Indicated work versus excess air factor

Z praktycznymi pomiarami wielkości fizycznych nierozdzielnie 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 ten można wyznaczyć z zależności [3]:

$$\delta L_i = \sqrt{\delta p^2 + \delta V^2}, \quad (1)$$

gdzie:

δp - błąd pomiaru ciśnienia w cylindrze [%],

δV - 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.

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

$$\delta cz = 0,5\% \quad [4], \quad (2)$$

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

gdzie:

δcz - błąd piezokwarcowego czujnika ciśnienia [%],

δw - błąd wzmacniacza [%],

$\delta(a/c)$ - błąd karty pomiarowej [%].

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

$$\delta(a/c) = \frac{\theta}{FSR} 100\%, \quad (3)$$

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

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

gdzie:

- θ - 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 błędu karty pomiarowej z przetwornikiem a/c.

$$\delta V = \sqrt{\delta k^2 + \delta(a/c)^2}, \quad (4)$$

gdzie:

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

Błąd znacznika kąta obrotu wału korbowego obliczono przy prostopadłym położeniu korbowodu względem ramienia wykorbienia wału korbowego, jako stosunek zmiany pojemności cylindra, odpowiadający $0,5^\circ$ OWK, czyli połowie wartości kroku kąтового znacznika, do pojemności skokowej cylindra.

$$\delta k = \frac{\Delta V}{V_s} 100\% = 0,45\%, \quad (5)$$

gdzie:

- ΔV - zmiana pojemności cylindra odpowiadająca czasowi trwania impulsu przebiegu prostokątnego znacznika kąta obrotu wału korbowego [m^3],
- V_s - pojemność skokowa [m^3].

Błąd karty pomiarowej (3): $\delta(a/c) = 0,024\%$.

Według zależności (1) 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]:

$$\Delta L_{ii} = t_s \sigma_{Lii}, \quad (6)$$

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:

$$\sigma_{Lii} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (L_{ii} - L_i)^2}, \quad (7)$$

gdzie:

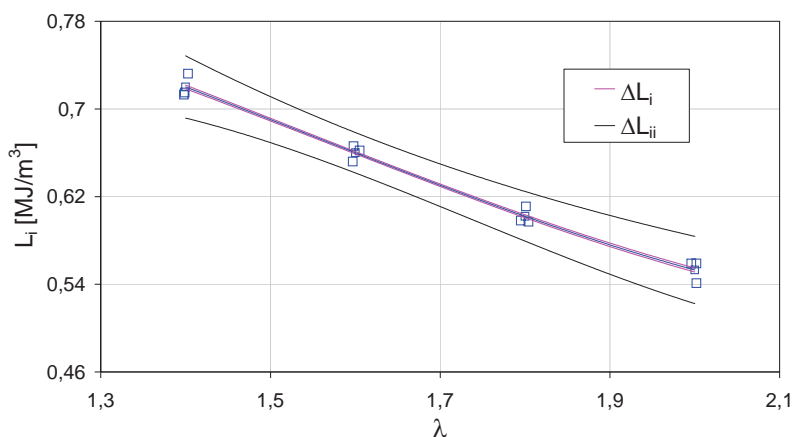
- N - liczba pomiarów,
- L_{ii} - wartości pracy indykowanej w poszczególnych cyklach [MJ/m^3],
- L_i - średnia wartość pracy indykowanej z trzech pomiarów zawierających po 95 zarejestrowanych cykli pracy silnika [MJ/m^3].

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]:

$$\Delta L_i = t_s \frac{\sigma_{Lii}}{\sqrt{N}}. \quad (8)$$

Na Rys. 3 przedstawiono przedziały niepewności wyznaczenia pracy indykowanej $\pm \Delta L_{ii}$ oraz niepewności wyznaczenia wartości średniej pracy indykowanej $\pm \Delta L_i$, naniesione na charakterystyce

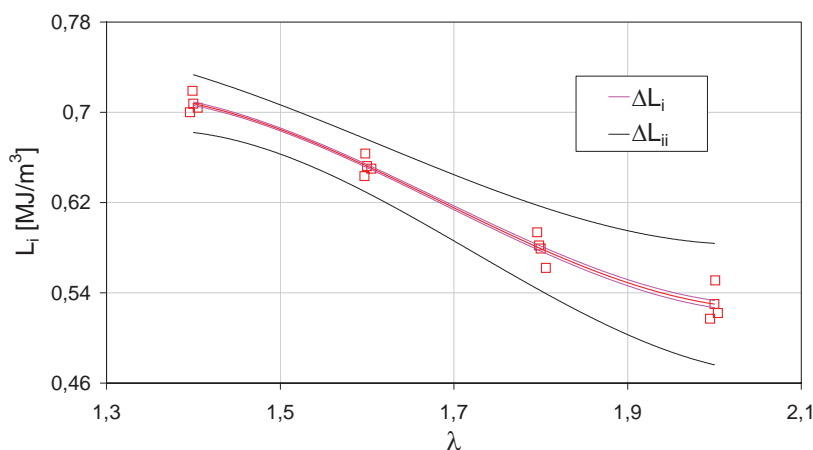
zmian średniej wartości L_i w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza, dla $Q_{in}/Q_{cał} = 2,5\%$. Wartość niepewności $\pm\Delta L_{ii}$ mieściła się w granicach od $\pm 0,02$ MPa dla $\lambda = 1,6$, co stanowi 2,8% średniej wartości pracy indykowanej, do $\pm 0,03$ MPa dla $\lambda = 2,0$, co stanowi 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. 3. Praca indykowana oraz przedziały niepewności wyznaczenia pracy indykowanej ΔL_{ii} i jej wartości średniej ΔL_i dla $Q_{in}/Q_{cał} = 2,5\%$

Fig. 3. Indicated work with uncertainty ranges determination indicated work ΔL_{ii} and its average value ΔL_i for $Q_{in}/Q_{tot} = 2.5\%$

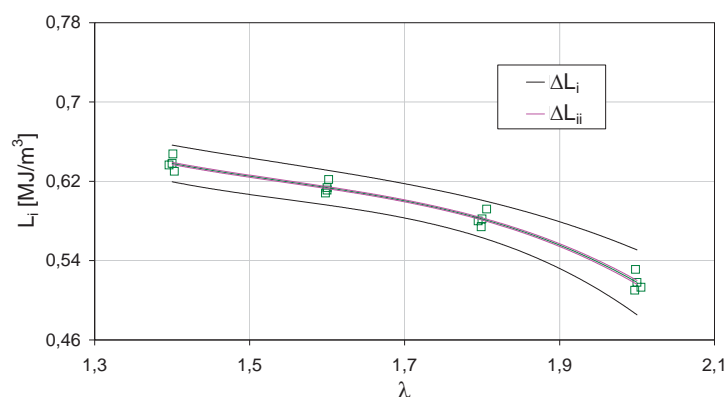
Gdy $Q_{in}/Q_{cał} = 5\%$ wartość niepewności $\pm\Delta L_{ii}$ mieściła się w granicach od $\pm 0,02$ MPa dla $\lambda = 1,6$, co stanowi 3,6% średniej wartości pracy indykowanej, do $\pm 0,05$ MPa dla $\lambda = 2,0$, co stanowi 10,2% wartości L_i . Wartość niepewności $\pm\Delta L_i$ zawierała się w przedziale od $\pm 0,001$ MPa dla $\lambda = 1,6$, co stanowi 0,21% średniej wartości pracy indykowanej, do $\pm 0,003$ MPa dla $\lambda = 2,0$, co stanowi 0,6% wartości L_i .



Rys. 4. Praca indykowana oraz przedziały niepewności wyznaczenia pracy indykowanej ΔL_{ii} i jej wartości średniej ΔL_i dla $Q_{in}/Q_{cał} = 5\%$

Fig. 4. Indicated work with uncertainty ranges determination indicated work ΔL_{ii} and its average value ΔL_i for $Q_{in}/Q_{tot} = 5\%$

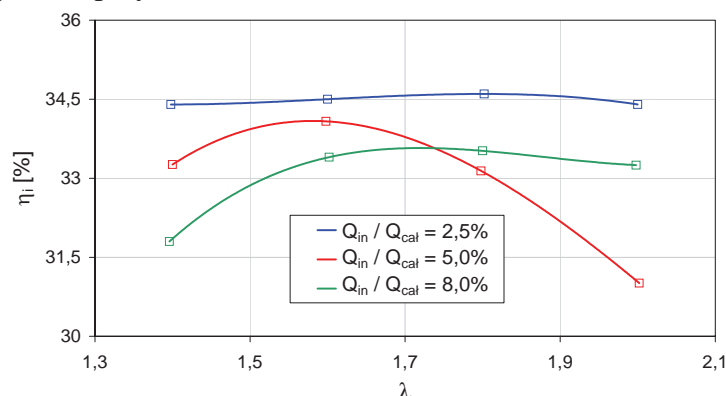
Gdy $Q_{in}/Q_{cał} = 8\%$ wartość niepewności $\pm\Delta L_{ii}$ mieściła się w granicach od $\pm 0,02$ MPa dla $\lambda = 1,6$, co stanowi 2,9% średniej wartości pracy indykowanej, do $\pm 0,03$ MPa dla $\lambda = 2,0$, co stanowi 6,3% wartości L_i . Wartość niepewności $\pm\Delta L_i$ zawierała się 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 0,37% wartości L_i .



Rys. 5. Praca indykowana oraz przedziały niepewności wyznaczenia pracy indykowanej ΔL_{ii} i jej wartości średniej ΔL_i dla $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$

Fig. 5. Indicated work with uncertainty ranges determination indicated work ΔL_{ii} and its average value ΔL_i , for $Q_{in}/Q_{tot} = 8\%$

Najwyższą sprawność indykowaną η_i silnik badawczy osiągnął, kiedy udział paliwa wzbogacającego mieszankę w komorze wstępnej wynosił 2,5%. Dla całego zakresu składu mieszanki palnej η_i utrzymywała się na prawie stałym poziomie - 34,5%. Maksymalne wartości sprawności indykowanej dla 5% i 8% udziału ładunku wzbogacającego uzyskiwane były przy różnych wartościach współczynników nadmiaru powietrza. Kiedy $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$ największą sprawność indykowaną silnik osiągnął przy $\lambda = 1,6$ i wyniosła ona 34%, dla $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$ sprawność 33,5% uzyskano przy $\lambda = 1,8$.



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 błęd pomiaru średniej pracy indykowanej i błęd pomiaru całkowitego ciepła dostarczonego do silnika.

Średnia wartość sprawności indykowanej wyrażona w % wynosi:

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

$$\eta_i = \frac{L_i V_s}{Q_{cyl} + Q_{in}} 100\%, \quad (9)$$

gdzie:

V_s - pojemność skokowa cylindra [m^3],

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:

$$\begin{aligned}\delta\eta_i &= \sqrt{\delta L_i^2 + \delta Q_{cat}^2}, \\ \delta Q_{cat} &= \sqrt{\delta Q_{cyl}^2 + \delta Q_{in}^2}, \\ \frac{\delta Q_{cat}}{Q_{cat}} &= \sqrt{\left(\frac{\delta Q_{cyl}}{Q_{cat}}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_{in}}{Q_{cat}}\right)^2}, \\ \frac{\delta Q_{cat}}{Q_{cat}} &= \sqrt{\left(\frac{\delta Q_{cyl}}{Q_{cyl} + Q_{in}} \frac{Q_{cyl}}{Q_{cyl}}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_{in}}{Q_{cyl} + Q_{in}} \frac{Q_{in}}{Q_{in}}\right)^2}, \\ \delta Q_{cat} &= \sqrt{\left(\frac{Q_{cyl}}{Q_{cyl} + Q_{in}}\right)^2 \delta Q_{cyl}^2 + \left(\frac{Q_{in}}{Q_{cyl} + Q_{in}}\right)^2 \delta Q_{in}^2}, \\ \delta\eta_i &= \sqrt{\delta L_i^2 + \left(\frac{Q_{cyl}}{Q_{cyl} + Q_{in}}\right)^2 \delta Q_{cyl}^2 + \left(\frac{Q_{in}}{Q_{cyl} + Q_{in}}\right)^2 \delta Q_{in}^2},\end{aligned}\tag{10}$$

gdzie:

δL_i - błąd pomiaru pracy indykowanej [%],

δQ_{cat} - błąd pomiaru całkowitego ciepła dostarczonego do silnika [%],

δQ_{cyl} - błąd pomiaru ciepła dostarczonego do cylindra silnika [%],

δQ_{in} - błąd pomiaru ciepła dostarczonego do komory wstępnej [%].

Błąd pomiaru pracy indykowanej (1):

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

Ciepło dostarczone do cylindra silnika:

$$Q_{cyl} = \frac{V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben}}{0,5 n t},\tag{11}$$

gdzie:

V_{cyl} - objętość benzyny doprowadzonej do cylindra silnika [m^3],

ρ_{ben} - gęstość benzyny [kg/m^3],

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:

$$\delta Q_{cyl} = \sqrt{\delta V_{cyl}^2 + \delta \rho_{ben}^2 + \delta W_{ben}^2 + \delta n^2 + \delta t^2},\tag{12}$$

gdzie:

δV_{cyl} - błąd pomiaru objętości benzyny doprowadzonej do cylindra silnika [%],

$\delta \rho_{ben}$ - szacunkowy błąd gęstości benzyny [%],

δW_{ben} - szacunkowy błąd wartości opałowej benzyny [%],

δn - błąd pomiaru prędkości obrotowej silnika [%],

δt - 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:

$$\delta V_{cyl} = \frac{dz. elem.}{V_{cyl}} 100\% = 2,5\% . \quad (13)$$

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:

$$\delta n = \frac{dz. elem.}{n} 100\% = 0,1\% . \quad (14)$$

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

$$\delta t = \frac{dz. elem.}{t} 100\% = 0,2\% . \quad (15)$$

Ciepło dostarczone do komory wstępnej silnika:

$$Q_{in} = \frac{\dot{V}_{in} \rho_{LPG} W_{LPG}}{0,5 n} , \quad (16)$$

gdzie:

\dot{V}_{in} - strumień objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej [m^3/min],

ρ_{LPG} - gęstość propanu-butanu [kg/m^3],

W_{LPG} - wartość opałowa propanu-butanu [MJ/kg].

Błąd pomiaru ciepła dostarczonego do komory wstępnej silnika:

$$\delta Q_{in} = \sqrt{\delta \dot{V}_{in}^2 + \delta \rho_{LPG}^2 + \delta W_{LPG}^2 + \delta n^2} , \quad (17)$$

gdzie:

$\delta \dot{V}_{in}$ - błąd pomiaru strumienia objętości propanu-butanu doprowadzonego do komory wstępnej [%],

$\delta \rho_{LPG}$ - szacunkowy błąd gęstości propanu-butanu [%],

δW_{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 rotametu gazowego do wartości zmierzonej strumienia objętości gazu:

$$\delta \dot{V}_{in} = \frac{dz. elem.}{\dot{V}_{in}} 100\% = 5\% . \quad (18)$$

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 (14):

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

Według zależności (10) 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]:

$$\begin{aligned} \Delta \eta_{ii} &= \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_i}{\partial L_i} \Delta L_{ii}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial n} \Delta n_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial t} \Delta t_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial \dot{V}_{in}} \Delta \dot{V}_{ini}\right)^2}, \\ \frac{\partial \eta_i}{\partial L_i} &= \frac{0,5 V_s n t}{\left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right)}, \\ \frac{\partial \eta_i}{\partial n} &= \frac{0,5 L_i V_s t}{\left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right)}, \\ \frac{\partial \eta_i}{\partial t} &= \frac{0,5 L_i V_s n \left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right) - 0,5 L_i V_s n t \dot{V}_{in} W_{LPG}}{\left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right)^2}, \\ \frac{\partial \eta_i}{\partial \dot{V}_{in}} &= \frac{-0,5 L_i V_s n t^2 W_{LPG}}{\left(V_{cyl} \rho_{ben} W_{ben} + \dot{V}_{in} W_{LPG} t\right)^2}. \end{aligned} \quad (19)$$

Niepewność wyznaczenia prędkości obrotowej silnika:

$$\Delta n_i = t_s \sigma_{ni}, \quad (20)$$

gdzie:

σ_{ni} - odchylenie standardowe pomiaru prędkości obrotowej silnika [1/min].

Niepewność wyznaczenia czasu zużycia benzyny w cylindrze silnika:

$$\Delta t_i = t_s \sigma_{ti}, \quad (21)$$

gdzie σ_{ti} - odchylenie standardowe wartości czasu zużycia dawki benzyny [min].

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

$$\Delta \dot{V}_{ini} = t_s \sigma_{\dot{V}_{ini}}, \quad (22)$$

gdzie:

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

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

$$\Delta \eta_i = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta_i}{\partial L_i} \Delta L_i\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial n} \Delta n\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial t} \Delta t\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_i}{\partial \dot{V}_{in}} \Delta \dot{V}_{in}\right)^2}. \quad (23)$$

Niepewność wyznaczenia wartości średniej pracy indykowanej:

$$\Delta L_i = t_s \frac{\sigma_{Lii}}{\sqrt{3}}. \quad (24)$$

Niepewność wyznaczenia wartości średniej prędkości obrotowej silnika:

$$\Delta n = t_s \frac{\sigma_{ni}}{\sqrt{3}}. \quad (25)$$

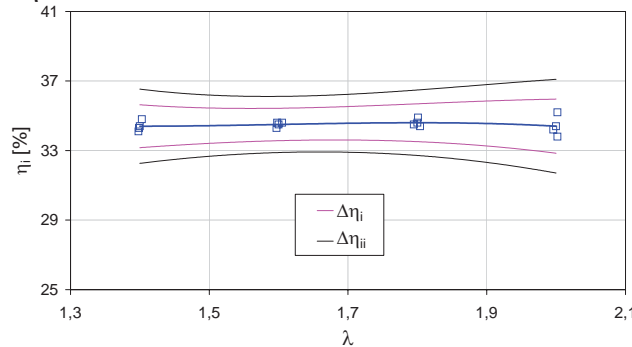
Niepewność wyznaczenia wartości średniej i czasu zużycia benzyny:

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

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

$$\Delta \dot{V}_{in} = t_s \frac{\sigma_{\dot{V}_{ini}}}{\sqrt{3}}. \quad (27)$$

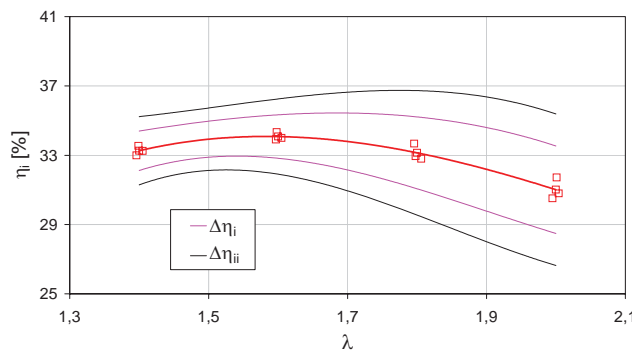
Na Rys. 7 przedstawiono przedziały niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej $\pm\Delta\eta_{ii}$ oraz niepewności wyznaczenia wartości średniej sprawności indykowanej $\pm\Delta\eta_i$, naniesione na charakterystyce zmian średniej wartości η_i w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza, dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$. Wartość niepewności $\pm\Delta\eta_{ii}$ 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 η_i . Wartość niepewności $\pm\Delta\eta_i$ zawierała się w przedziale od $\pm 0,9\%$ dla $\lambda = 1,6$, co stanowi $2,7\%$ wartości η_i , do $\pm 1,6\%$ dla $\lambda = 2,0$, co stanowi $4,5\%$ wartości średniej η_i .



Rys. 7. Sprawność indykowana oraz przedziały niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej $\Delta\eta_{ii}$ i jej wartości średniej $\Delta\eta_i$ dla $Q_{ir}/Q_{cat} = 2,5\%$

Fig. 7. Indicated efficiency with uncertainty ranges determination indicated efficiency $\Delta\eta_{ii}$ and its average value $\Delta\eta_i$ for $Q_{ir}/Q_{tot} = 2,5\%$

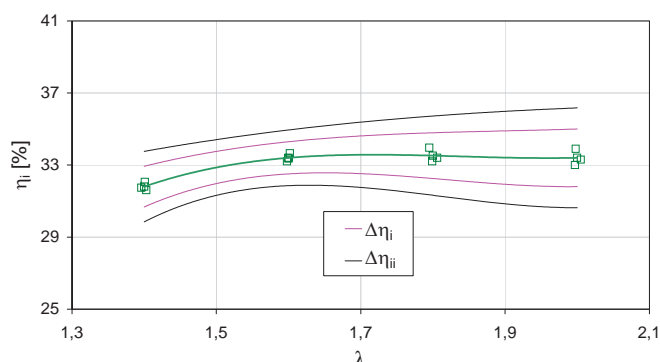
Gdy $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$ wartość niepewności $\pm\Delta\eta_{ii}$ mieściła się w granicach od $\pm 2,2\%$ dla $\lambda = 1,6$, co stanowi $6,4\%$ średniej wartości sprawności indykowanej, do $\pm 4,4\%$ dla $\lambda = 2,0$, co stanowi $14,1\%$ wartości η_i . Wartość niepewności $\pm\Delta\eta_i$ zawierała się w przedziale od $\pm 1,3\%$ dla $\lambda = 1,6$, co stanowi $3,7\%$ wartości η_i , do $\pm 2,5\%$ dla $\lambda = 2,0$, co stanowi $8,1\%$ wartości średniej η_i .



Rys. 8. Sprawność indykowana oraz przedziały niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej $\Delta\eta_{ii}$ i jej wartości średniej $\Delta\eta_i$ dla $Q_{ir}/Q_{cat} = 5\%$

Fig. 8. Indicated efficiency with uncertainty ranges determination indicated efficiency $\Delta\eta_{ii}$ and its average value $\Delta\eta_i$ for $Q_{ir}/Q_{tot} = 5\%$

Gdy $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$ wartość niepewności $\pm\Delta\eta_{ii}$ mieściła się w granicach od $\pm 1,5\%$ dla $\lambda = 1,6$, co stanowi 4,6% średniej wartości sprawności indykowanej, do $\pm 2,8\%$ dla $\lambda = 2,0$, co stanowi 8,3% wartości η_i . Wartość niepewności $\pm\Delta\eta_i$ zawierała się w przedziale od $\pm 0,9\%$ dla $\lambda = 1,6$, co stanowi 2,7% wartości η_i , do $\pm 1,6\%$ dla $\lambda = 2,0$, co stanowi 4,8% wartości średniej η_i .



Rys. 9. Sprawność indykowana oraz przedziały niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej $\Delta\eta_{ii}$ i jej wartości średniej $\Delta\eta_i$ dla $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$

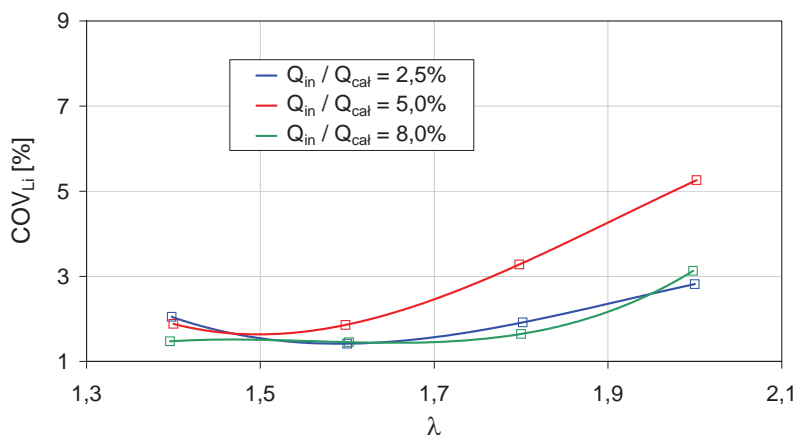
Fig. 9. Indicated efficiency with uncertainty ranges determination indicated efficiency $\Delta\eta_{ii}$ and its average value $\Delta\eta_i$ for $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$

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.

$$COV_{Li} = \frac{\sigma_{Li}}{L_i} 100\% . \quad (28)$$

Praca silnika konwencjonalnego realizującego jednostopniowy system spalania zasilanego mieszkanką homogeniczną, w zakresie wysokich wartości λ , 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%.

Najmniejsze wartości współczynnika COV_{Li} , wynoszące od 1,45% dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5$ i 8% do 1,86% dla $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$, uzyskano dla każdego z trzech rozpatrywanych udziałów ładunku wzbogacającego w komorze wstępnej przy λ równym około 1,6.



Rys. 10. Współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza
Fig. 10. Non-repeatability factor of indicated work versus excess air factor

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

$$\Delta COV_{Li} = t_s \sigma_{COV_{Li}}, \quad (29)$$

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 $\sigma_{\sigma_{Lii}}$ oraz niepewność wyznaczenia średniej wartości pracy indykowanej L_i .

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

$$\sigma_{COV_{Li}}^2 = \left(\frac{\partial COV_{Li}}{\partial \sigma_{Lii}} \right)^2 \sigma_{\sigma_{Lii}}^2 + \left(\frac{\partial COV_{Li}}{\partial L_i} \right)^2 \sigma_{L_i}^2, \quad (30)$$

gdzie:

$\sigma_{\sigma_{Lii}}$ - odchylenie standardowe odchylenia standardowego pracy indykowanej [MJ/m³],

σ_{L_i} - odchylenie standardowe wartości średniej pracy indykowanej [MJ/m³].

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

$$\sigma_{COV_{Li}} = 100\% \sqrt{\left(\frac{1}{L_i} \right)^2 \sigma_{\sigma_{Lii}}^2 + \left(-\frac{\sigma_{Lii}}{L_i^2} \right)^2 \sigma_{L_i}^2}, \quad (31)$$

Odchylenie standardowe odchylenia standardowego pracy indykowanej (względna niepewność σ_{Lii}) wynosi [3]:

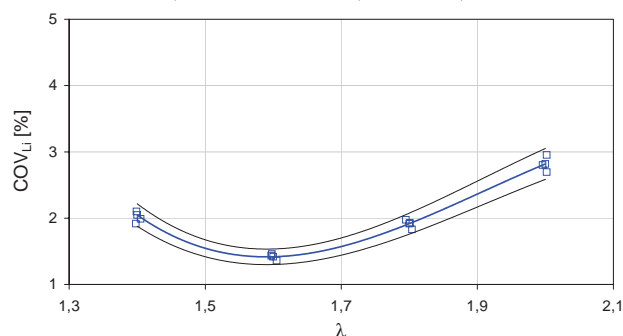
$$\sigma_{\sigma_{Lii}} = \sigma_{Lii} \frac{1}{\sqrt{2(N-1)}}, \quad (32)$$

Odchylenie standardowe wartości średniej pracy indykowanej:

$$\sigma_{L_i} = \frac{\sigma_{Lii}}{\sqrt{N}}. \quad (33)$$

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

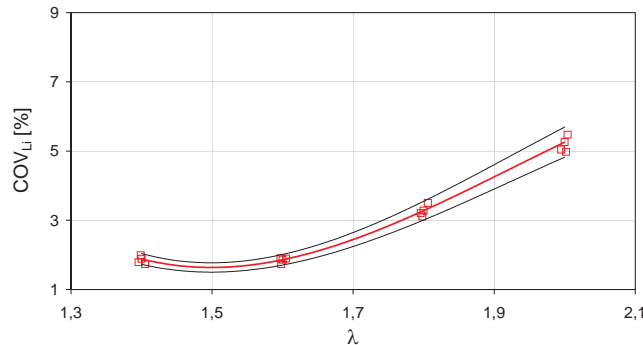
Na Rys. 11 przedstawiono przedziały niepewności wyznaczenia wartości współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej $\pm \Delta COV_{Li}$, naniesione na charakterystyce zmian COV_{Li} w funkcji współczynnika nadmiaru powietrza, dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$. Dla całego zakresu λ wartość niepewności $\pm \Delta COV_{Li}$ 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. 11. Współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej COV_{Li} oraz przedziały niepewności wyznaczenia współczynnika COV_{Li} dla $Q_{in}/Q_{cat} = 2,5\%$

Fig. 11. Non-repeatability factor of indicated work COV_{Li} with uncertainty ranges determination COV_{Li} for $Q_{in}/Q_{tot} = 2.5\%$

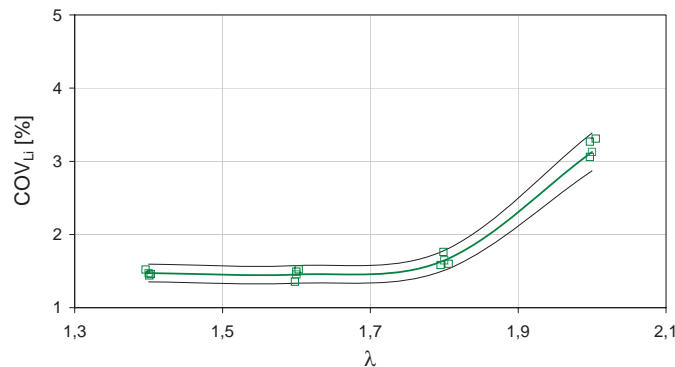
Gdy $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$ wartość niepewności $\pm\Delta COV_{Li}$ stanowiła 8,3% wartości współczynnika niepowtarzalności pracy indykowanej COV_{Li} i mieściła się w granicach od $\pm 0,15\%$ dla $\lambda = 1,6$ do $\pm 0,43\%$ dla $\lambda = 2,0$.



Rys. 12. Współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej COV_{Li} oraz przedziały niepewności wyznaczenia współczynnika COV_{Li} dla $Q_{in}/Q_{cat} = 5\%$

Fig. 12. Non-repeatability factor of indicated work COV_{Li} with uncertainty ranges determination COV_{Li} , for $Q_{in}/Q_{tot} = 5\%$

Gdy $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$ 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 $\pm 0,26\%$ dla $\lambda = 2,0$.



Rys. 13. Współczynnik niepowtarzalności pracy indykowanej COV_{Li} oraz przedziały niepewności wyznaczenia współczynnika COV_{Li} dla $Q_{in}/Q_{cat} = 8\%$

Fig. 13. Non-repeatability factor of indicated work COV_{Li} with uncertainty ranges determination COV_{Li} , for $Q_{in}/Q_{tot} = 8\%$

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 niemówiącym.

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 pracę 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: $\Delta L_{ii} = 10,2\%$. Błąd pomiaru sprawności indykowanej silnika badawczego: $\delta \eta_i = 6\%$. Maksymalna wartość niepewności wyznaczenia sprawności indykowanej: $\Delta \eta_{ii} = 14,1\%$. Niepewność wyznaczenia współczynnika niepowtarzalność pracy indykowanej silnika: $\Delta COV_{Li} = 8,3\%$

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.

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 błędu 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.

