

Zdzisław CHŁOPEK\*  
Piotr STASIAK\*\*

## Analiza niepowtarzalności sygnału ciśnienia indykowanego silnika spalinowego

*W pracy przeprowadzono analizę niepowtarzalności sygnału ciśnienia indykowanego w statycznych warunkach pracy silnika. Stwierdzono znacząco niepowtarzalność badanego sygnału, wynikającą z nierównomierności prędkości obrotowej oraz z zakłóceń wartości ciśnienia w poszczególnych pseudookresach. Zbadano stacjonarność sygnału ciśnienia indykowanego. Zaproponowano metodę wtórnego próbkowania w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego, dzięki czemu zastosowanie uśredniania synchronicznego do tak przetworzonego sygnału okazało się skutecznym sposobem zmniejszenia udziału zakłóceń w podstawowym sygnale okresowym. Zbadano właściwości statystyczne sygnału odchyłki ciśnienia indykowanego od ciśnienia uśrednionego w pseudookresach. Stwierdzono, że jest to szum szerokopasmowy i że nie ma podstaw do sformułowania hipotezy o zgodności badanego sygnału z rozkładem normalnym.*

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, indykowanie silników spalinowych, sygnał ciśnienia indykowanego

### The analysis of an unrepeatability of cylinder pressure signal in internal combustion engines

*In this paper an analysis of irrepeatability of cylinder pressure signal in static conditions of engine work was performed. Large irregularity of analysed signal was stated that follows the irregularity of engine speed and pressure value distortions in each quasi-period. A stationarity of cylinder pressure was studied. Resampling data method in the revolution angle domain was suggested. Due to this synchronised averaging, transformed signal was an effective method of eliminating distortions in the basic periodical signal. Static properties of signal deviations (deviations of cylinder pressure from pressure averaged in quasi-periods) were studied. It was stated that the analysed distortions are a wide-range noise and there is no reason to formulate a hypothesis regarding the analysed signal conformity with a normal distribution.*

Key words: combustion engines, measurement of cylinder pressure, cylinder pressure signal

### Wstęp

Sygnał ciśnienia indykowanego jest sygnałem ciśnienia panującego w cylindrze silnika spalinowego. Sygnał indykatorowy jest źródłem informacji o podstawowych właściwościach silnika oraz o procesach w nim zachodzących.

Istnieje wiele problemów pomiaru, rejestracji i analizy sygnału ciśnienia indykowanego. Do najważniejszych problemów pomiaru i rejestracji ciśnienia indykowanego należy zaliczyć trudne ze względu na obciążenia cieplne i mechaniczne warunki w miejscu pomiaru. Ponadto – w silnikach o zapłonie iskrowym – występują silne zakłócenia elektromagnetyczne związane z pracą układu zapłonu. Istotne jest również, że sygnał indykatorowy charakteryzuje się dużą rozpiętością wartości oraz bardzo znacznymi właściwościami dynamicznymi. Z powodu właściwości dynamicznych jest konieczne stosowanie w rejestracji cyfrowej dużych częstotliwości próbkowania, to z kolei stawia wymagania rozdzielczości kwantowania sygnału [4, 5].

Sygnał indykatorowy jest sygnałem pseudookresowym. Jest to jeden z powodów istotnych trudności w analizie sygnału indykatorowego, szczególnie w wypadku rejestracji sygnału jako funkcji czasu. W tym wypadku występuje nierównomierność pseudookresów w związku z fluktuacjami prędkości obrotowej nawet w statycznych warunkach pracy silnika [6–9]. Tego problemu pozornie nie ma w wypadku rejestracji sygnału indykatorowego jako funkcji kąta obrotu wału korbowego. W rzeczywistości wygenerowany sygnał położenia wału korbowego jest obciążony błędami spowo-

### Introduction

A signal of cylinder pressure is a notation of a process of pressure inside a combustion chamber of an engine. This signal is a source of information about basic properties of engine and all processes that occur inside.

There are many problems related to measurement, registration and analysis of cylinder pressure signal. One of the most important problems of measurement and registration of the cylinder pressure is hard thermal and mechanical conditions in the location of the pressure indicator. Moreover, in engines with battery ignition, strong electro-magnetic distortions occur while the ignition system is working.

It is also significant that cylinder pressure signal has a very wide range of values and it is also very dynamic. Because of that dynamism it is necessary to use high sampling frequencies in digital registering, which in turn determines proper quantization resolution [4, 5].

Cylinder pressure signal is quasi-periodical. That is one of the reasons for significant difficulties in the cylinder pressure signal analysis, especially in the case of registering signal against time. In this case it is possible to observe an irregularity of periods connected with crankshaft speed fluctuation, including the static conditions of measurements. [6–9]. This problem seemingly doesn't appear in the case of registering signal against degree of crankshaft revolution. In fact, the generated signal of the crankshaft position is weighed by errors caused by the dynamic phenomena that occur in piston-crank assembly, particularly crankshaft angle vibrations.

dowanymi zjawiskami dynamicznymi zachodzącymi w układzie tłokowo–korbowym, szczególnie drganiami kątowymi wału korbowego.

Istotnym problemem jest synchronizacja sygnału indykatorowego z innymi sygnałami rejestrowanych procesów zachodzących w silniku. Problem ten wynika przede wszystkim z opóźnień o skomplikowanych właściwościach w układzie generowania sygnału indykatorowego. Utrudnia to znacznie zsynchronizowanie sygnału indykowanego z cyklem pracy silnika – problem ten jest znany w literaturze i praktyce badawczej jako problem identyfikacji górnego zwrotnego położenia tłoka [15]. W wypadku analizowania procesów zachodzących w obiegu silnika problem identyfikacji górnego zwrotnego położenia tłoka może w znacznym stopniu zdeterminować wyniki badań.

Parametry z jakimi jest zarejestrowany sygnał indykatorowy mogą w znacznym stopniu powodować trudności w dalszym przetwarzaniu sygnału. Problem ten występuje m.in. w wypadku różniczkowania sygnału, co jest konieczne m.in. w badaniu wywiązywania ciepła, czy w analizie procesów sprężania i rozprężania, a także w identyfikacji górnego zwrotnego położenia tłoka [4, 5].

Charakterystyczne właściwości sygnału indykatorowego powodują, że w jego przetwarzaniu w wielu wypadkach mogą się okazać mało skuteczne powszechne (zautomatyzowane) metody przetwarzania. Tak jest m.in. w wypadku filtracji dolnoprzepustowej w dziedzinie częstotliwości w celu wyeliminowania z sygnału użytecznego szumów o wysokich częstotliwościach. Znamionną cechą sygnału indykatorowego jest występowanie nieciągłości jego pochodnej względem czasu przed górnym zwrotnym położeniem tłoka z powodu rozpoczęcia się procesu spalania. Powszechnie stosowane algorytmy filtracji dolnoprzepustowej, jeśli są dostatecznie skuteczne ze względu na usuwanie wysokoczęstotliwościowych szumów, mogą spowodować utratę informacji o początku spalania, która jest bardzo ważna w analizie procesów zachodzących w obiegu silnika.

W pracy autorzy przeprowadzili analizę niepewtarzalności sygnału indykatorowego zarejestrowanego w dziedzinie czasu ze względu zarówno na nierównomierność pseudokresów, spowodowaną nierównomiernością prędkości obrotowej, jak i składowych sygnału o tak znacznym stopniu nieokreśloności, że upoważnia to do kwalifikowania ich do kategorii procesów przypadkowych.

### **Przetwarzanie sygnału ciśnienia indykowanego w celu oceny jego niepewtarzalności**

Przedmiotem badań był sygnał indykatorowy zarejestrowany na sześciocyndrowym silniku okrętowym Sulzer typu 6AL 20/24 o objętości skokowej 37,7 dm<sup>3</sup>, o mocy znamionowej 420 kW przy prędkości obrotowej 750 min<sup>-1</sup> [6–9]. Badania przeprowadzono w statycznych warunkach pracy, tzn. takich, które w zakresie częstotliwości odpowiadającym warunkom rzeczywistego użytkowania silnika są niezależne od czasu [3]. Punkt pracy, w którym wykonywano badania był określony prędkością obrotową 708 min<sup>-1</sup> i momentem obrotowym 5,7 kN·m.

The essential problem is the cylinder pressure signal synchronization with other registered signals of the processes occurring inside the engine. This problem is a result of delays that complicate the characteristics while generating cylinder pressure signal. This makes it difficult to synchronize cylinder signal with engine work cycle – this problem is well known in literature and laboratory practice as a problem of identification of DTC [15]. When analyzing processes which occur in the engine circulation the problem of identification of DTC may have a substantial impact on the results of the measurements.

Parameters set in the registering process may cause difficulties in further signal processing to a large extent. This problem appears while differentiating the signal, which is necessary in the tests for heat release or analysing the processes of compression or decompression and identifying of the DTC [4, 5].

Characteristic properties of the cylinder pressure signal cause that many common (automatic) methods of analysis are not effective enough. This can be observed in low-pass filtering in frequency domain, which is used for eliminating high frequency noises from the useful signal. Characteristic feature of the cylinder pressure signal is the discontinuity of derivative against time before the DTC because of the onset of the combustion process. Commonly used algorithms of low-pass filtering (if they are effective enough in eliminating high frequency noises) may cause loss of information about combustion starting point, which is very important in analysing the internal engine processes.

In this research authors have analysed the uniqueness of cylinder pressure signal registered against time for the sake of both irregularity of quasi-periods, caused by the irregularity of crankshaft speed and components of signal, which are indeterminate enough to classify them in the stochastic processes.

### **Processing cylinder pressure's signal for sake of evaluation its uniqueness**

The purpose of the research was to determine the cylinder pressure signal registered from 6 cylinder marine engine Sulzer, type 6AL 20/24, of 37,7 dm<sup>3</sup> of stroke capacity, nominal power of 420 kW by 750 rpm [6–9]. The research was conducted under static conditions, i.e. those, which in the range of frequencies fulfil the realistic conditions of work and are independent of time [3]. Point of work, where the research was performed, was determined by crankshaft speed of 708 RPM and torque of 5,7 kN·m.

The signal was registered with sampling step  $\Delta t = 50$  ms, for quantization 12-bit a/d converter was used. Registered discrete signal was set of  $K = 524288$  real numbers.

On figure 1 a fragment of the registered cylinder pressure signal is shown. The results of initial signal analysis show that the signal is characterized by a high irregularity and significant distortions by high frequency noises.

In order to eliminate high frequency noises from the useful signal low-pass filter was used. A linear recurrent filter was applied [1, 4, 5, 13, 14]:

Sygnał został zarejestrowany z odstępem próbkowania  $\Delta t = 50$  ms; do jego kwantowania zastosowano przetwornik 12-bitowy. Zarejestrowany sygnał dyskretny jest zbiorem o liczności  $K = 524288$  liczb rzeczywistych.

Na rysunku 1 przedstawiono fragment zarejestrowanego sygnału indykatorowego. Ze wstępnej analizy sygnału wynika, że cechuje go duża nierównomierność oraz znaczne zakłócenia szumami o wysokich częstotliwościach.

W celu zmniejszenia udziału w sygnale użytecznym wysokoczęstotliwościowych szumów zastosowano filtrację dolnoprzepustową. Zastosowano liniowy filtr nierekurencyjny [1, 4, 5, 13, 14]:

$$p_{gi} = (0,125\tilde{p}_{g\ i-3} + 0,25\tilde{p}_{g\ i-2} + 0,5\tilde{p}_{g\ i-1} + \tilde{p}_{g\ i} + 0,5\tilde{p}_{g\ i+1} + 0,25\tilde{p}_{g\ i+2} + 0,125\tilde{p}_{g\ i+3}) / 2,75$$

dla  $3 < i < K - 2$

$$p_{gi} = (0,25\tilde{p}_{g\ i-2} + 0,5\tilde{p}_{g\ i-1} + \tilde{p}_{g\ i} + 0,5\tilde{p}_{g\ i+1} + 0,25\tilde{p}_{g\ i+2}) / 2,5$$

dla  $i = 3$  oraz  $i = K - 2$

$$p_{gi} = (0,5\tilde{p}_{g\ i-1} + \tilde{p}_{g\ i} + 0,5\tilde{p}_{g\ i+1}) / 2$$

dla  $i = 2$  oraz  $i = K - 1$

$$p_{gi} = \tilde{p}_{g\ i}$$

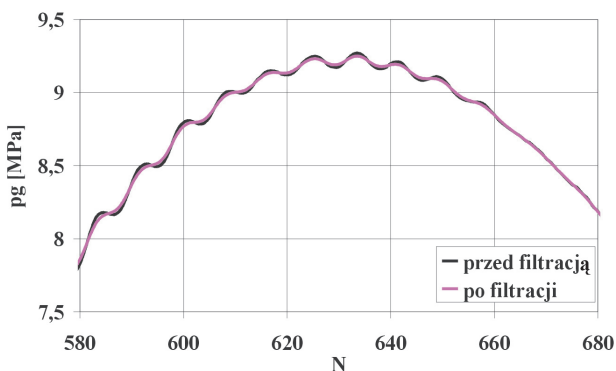
dla  $i = 1$  oraz  $i = K$

Skutek filtracji sygnału przedstawiono na rysunku 2.

Sygnał ciśnienia indykowanego jest sygnałem o pseudookresie:

$$T = 120/n \text{ [s]}, \tag{2}$$

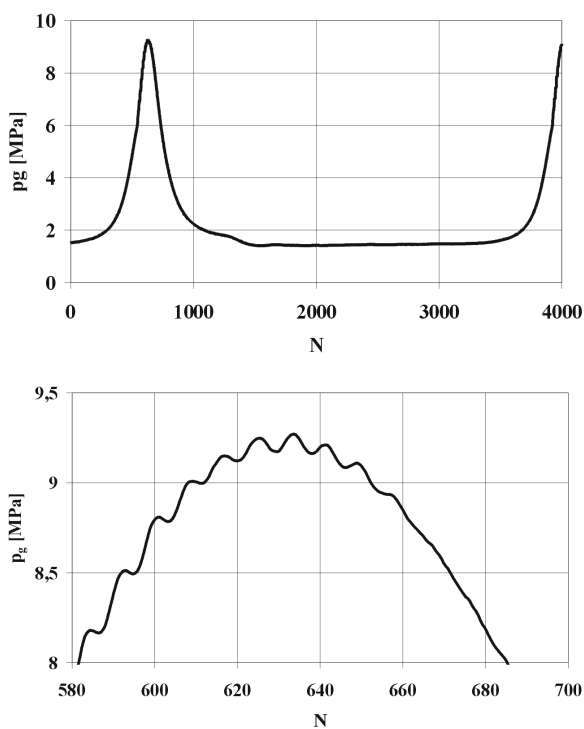
gdzie: prędkość obrotowa  $n$  [ $\text{min}^{-1}$ ].



Rys. 2. Fragment sygnału indykatorowego: zarejestrowanego i przefiltrowanego (w powiększeniu)

Fig. 2. A fragment of cylinder pressure signal: registered and filtered (in expansion)

W celu analizy nierównomierności pseudookresów konieczne jest ich wyznaczenie. Do wyznaczania pseudookresów wykorzystano identyfikację lokalnych maksimum sygnału w poszczególnych pseudookresach. Zastosowano w tym celu procedurę odcinkowej aproksymacji wartości sygnału w okolicach maksimum wielomianem stopnia drugiego. Jako zmienną niezależną maksimum przyjmowano zmienną niezależną punktu, najbliższego położonego od maksimum funkcji aproksymującej badany fragment sygnału.



Kys. 1. Fragment zarejestrowanego sygnału indykatorowego wraz z powiększeniem

Fig. 1. A fragment of registered cylinder pressure signal with its expansion

$$p_{gi} = (0,125\tilde{p}_{g\ i-3} + 0,25\tilde{p}_{g\ i-2} + 0,5\tilde{p}_{g\ i-1} + \tilde{p}_{g\ i} + 0,5\tilde{p}_{g\ i+1} + 0,25\tilde{p}_{g\ i+2} + 0,125\tilde{p}_{g\ i+3}) / 2,75$$

dla  $3 < i < K - 2$

$$p_{gi} = (0,25\tilde{p}_{g\ i-2} + 0,5\tilde{p}_{g\ i-1} + \tilde{p}_{g\ i} + 0,5\tilde{p}_{g\ i+1} + 0,25\tilde{p}_{g\ i+2}) / 2,5$$

dla  $i = 3$  oraz  $i = K - 2$

$$p_{gi} = (0,5\tilde{p}_{g\ i-1} + \tilde{p}_{g\ i} + 0,5\tilde{p}_{g\ i+1}) / 2$$

dla  $i = 2$  oraz  $i = K - 1$

$$p_{gi} = \tilde{p}_{g\ i}$$

dla  $i = 1$  oraz  $i = K$

The results of filtering are presented on figure 2. Cylinder pressure signal is a quasi-periodic signal, its period is given:

$$T = 120/n \text{ [s]} \tag{2}$$

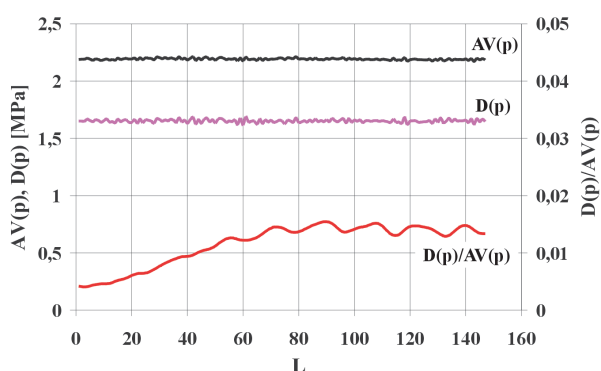
where  $n$  – engine speed [RPM].

In order to analyse the irregularity of quasi-periods it is necessary to calculate them. To calculate quasi-periods the identification of local maximum of signal was used in each period. To this end, a procedure of serialized estimation in the vicinity of the maximum by 2° polynomial was used. An independent variable of the nearest point of maximum estimated function was used as an independent variable of maximum.

$T$  in expression [ ]<sup>T</sup> means transposed matrix, not quasi-period

Zidentyfikowane maksima lokalne w pseudookresach zostały przyjęte jako początki pseudookresów. W wyniku identyfikacji pseudookresów wyznaczono wektory: pseudookresów  $T = [T_i]^T$ <sup>1)</sup> oraz uśrednionych w pseudookresach prędkości obrotowych  $n = [n_i]^T$ , gdzie  $i = 1, 2, \dots, 147$ . Sygnały pseudookresów i prędkości obrotowych uśrednionych w pseudookresach przedstawiono na rysunku 3.

Następnie przeprowadzono badania stacjonarności sygnału pseudookresów ze względu na wartość średnią jako estymator wartości oczekiwanej  $AV(p_g)$  oraz ze względu na odchylenie standardowe –  $D(p_g)$ . Na rysunku 4 przedstawiono uśrednianie od początku pomiaru: wartość średnią i odchylenie standardowe. Przedstawiono również wskaźnik zmienności będący ilorazem odchylenia i wartości średniej.



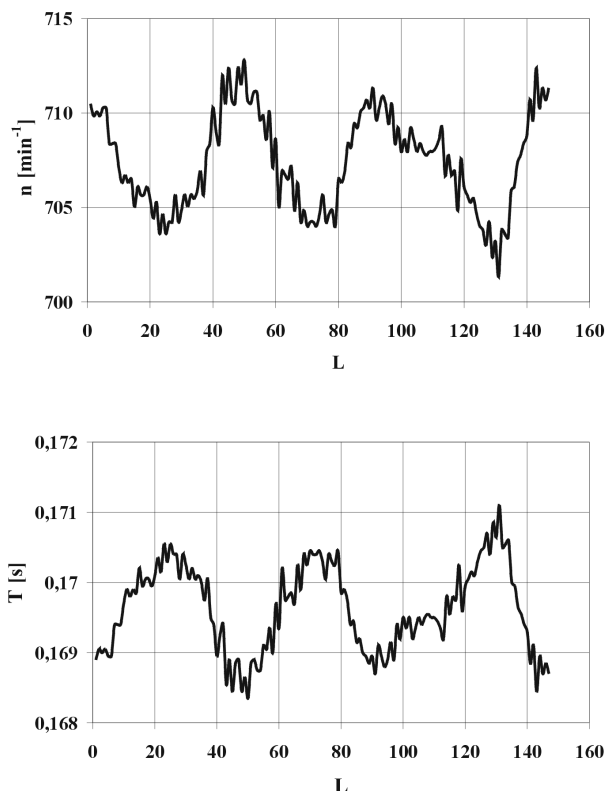
Rys. 4. Ilustracja badania stacjonarności sygnału pseudookresów  
Fig. 4. Illustration of test of stationarity of quasi-periods signal

Na podstawie przeprowadzonej analizy można przyjąć, że badane sygnały pseudookresów i uśrednionych w pseudookresach prędkości obrotowych są stacjonarne ze względu na wartość średnią i odchylenie standardowe.

Wektory, zawierające wartości ciśnień indykowanych w poszczególnych pseudookresach, mają różne liczby swych elementów. W związku z tym uśrednianie synchroniczne nie jest w tym wypadku skutecznym sposobem zmniejszania udziału szumów wysokoczęstotliwościowych w sygnale użytecznym: w wypadku dużej liczby pseudookresów uśrednianie synchroniczne staje się estymatorem wartości średniej.

W celu zastosowania uśredniania synchronicznego do sygnału indykowanego dokonano operacji wtórnego próbkowania sygnału zgodnie z kryterium równej liczby próbkowanych punktów w każdym z pseudookresów. Przyjęto założenie, że wtórne próbkowanie ma się odbywać z częstotliwością odpowiadającą kątowi  $0,2^\circ$  obrotu wału korbowego, co oznacza, że wektory zawierające spróbkowane wartości ciśnienia indykowanego dla poszczególnych pseudookresów będą miały liczebność elementów wynoszącą 3600. Do realizacji wtórnego próbkowania sygnału ciśnienia indykowanego w poszczególnych pseudookresach użyto procedury *Resam-*

Identified local maximums in quasi-periods were set as a beginnings of quasi-periods. As a result of identification of quasi-periods set of vectors was determined: vector of quasi-periods  $T = [T_i]^T$ <sup>1)</sup> and revolution speed averaged in quasi-periods  $n = [n_i]^T$ , where  $i = 1, 2, \dots, 147$ . Signals of quasi-periods and revolution speeds averaged in quasi-periods are presented on figure 3.



Rys. 3. Sygnały pseudookresów i prędkości obrotowych uśrednionych w pseudookresach

Fig. 3. Signals of quasi-periods and revolution speed averaged in quasi-periods

Next, a stationarity test of quasi-periods signal for determining the average value as (estimator of average value)  $AV(p_g)$  and for standard deviation –  $D(p_g)$  was performed. In figure 4 averaging from the beginning of measurement is presented: mean value and standard deviation. Changeability rate (quotient of mean value and standard deviation) is also presented.

On the basis of the foregoing test we assume that the examined quasi-period signals and revolution speeds averaged in quasi-periods are stationary for mean value and standard deviation.

Vectors, which contain values of cylinder pressure in each quasi-period, are of different size. In this respect, the synchronized averaging isn't an effective method of decreasing participation of high frequency noises in the useful signal. If there is a large number of quasi-periods synchronized averaging becomes the estimator of the average value.

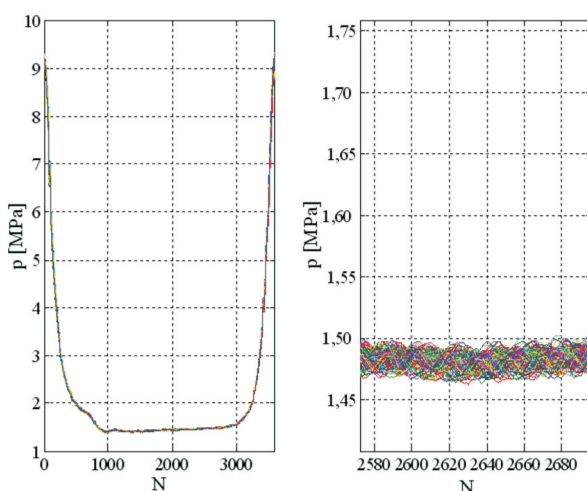
<sup>1)</sup> W odróżnieniu od oznaczenia pseudookresu symbol  $T$  w wyrażeniu  $[ ]^T$  oznacza macierz transponowaną.

ple z biblioteki oprogramowania MATLAB. Zasadą numeryczną zastosowanej procedury jest odcinkowa aproksymacja zbiorów pierwotnych danych funkcją wielomianową z użyciem  $2r + 1$  punktów pierwotnych. W wyniku analizy testów procedury Resample dla badanego sygnału wybrano do realizacji parametr  $r = 2$ .

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki wtórnego próbkowania sygnału ciśnienia indykowanego w poszczególnych pseudookresach. Dalsze operacje wykonywano na sygnale wtórnie spróbkowanym.

Uśrednianie synchroniczne sygnału ciśnienia indykowanego w poszczególnych pseudookresach wykonano zgodnie z algorytmem [1, 13, 14]:

$$p_i = \frac{1}{l} \sum_{m=1}^l y_{i-m \cdot 3600} . \quad (3)$$



Rys. 5. Wynik wtórnego próbkowania sygnału ciśnienia indykowanego w poszczególnych pseudookresach oraz powiększenie fragmentu wykresu

Fig. 5. Result of resampling cylinder pressure signal in each quasi-period with expansion of fragment of a chart

Następnie wyznaczono odchyłki ciśnienia indykowanego od ciśnienia uśrednionego w pseudookresach:

$$\Delta p_{i+m \cdot 3600} = y_{i+k \cdot 3600} - p_i \quad (4)$$

gdzie:  $m = 1, 2, \dots, l$ .

Przebieg odchyłek ciśnienia indykowanego od ciśnienia uśrednionego w pseudookresach przedstawiono na rysunku 6.

Charakterystyczne są znaczne wartości odchyłek ciśnienia indykowanego od ciśnienia uśrednionego w pseudookresach sygnału w okolicach ciśnienia maksymalnego. Wynika to z faktu, że dla tych zakresów kąta obrotu wału korbowego występują ekstremalne wartości pochodnych ciśnienia względem kąta obrotu: maksimum pochodnej dla kąta mniejszego niż kąt maksimum ciśnienia i minimum pochodnej dla kąta większego.

Mając wyznaczone wartości odchyłek od średniego ciśnienia dla każdego punktu przebiegu zarejestrowanego dokonano estymacji przebiegi gęstości prawdopodobieństwa odchyłek w pseudookresie. Na rysunku 7 przedstawiono gęstość prawdopodobieństwa dwunastu odchyłek standa-

In order to apply synchronized averaging on cylinder pressure signal it was necessary to resample the signal according to criterion of equal number of sampled points in each quasi-period. It was assumed that a new sampling step should be appropriate to  $0,2^\circ$  of crankshaft revolution, which means that the vectors that consist of the resampled values of cylinder pressure for each quasi-period will have the size of 3600 points. In order to realise the resampling of signal in each quasi-period procedure RESAMPLE was used (one of the procedures from MATLAB toolbox). A numeric rule of used procedure is a serialized approximation of sets of original data by polynomial function using  $2r + 1$  original points. After testing, the RESAMPLE procedure for the tested signal parameter  $r=2$  was chosen.

Results of resampling cylinder pressure signal in each quasi-period are presented in figure 5. Further operations were performed on a resampled signal. Synchronized averaging of cylinder pressure signal in each quasi-period was performed according to the algorithm [1, 13, 14]:

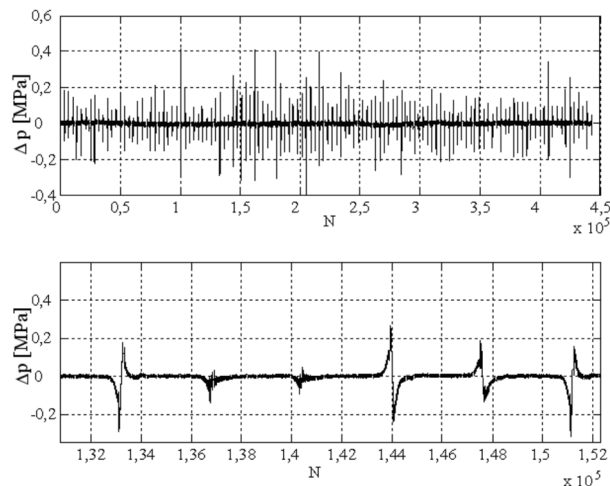
$$p_i = \frac{1}{l} \sum_{m=1}^l y_{i-m \cdot 3600} . \quad (3)$$

Next, deviations of cylinder pressure from averaged pressure were determined in the quasi-periods:

$$\Delta p_{i+m \cdot 3600} = y_{i+k \cdot 3600} - p_i \quad (4)$$

where:  $m = 1, 2, \dots, l$ .

The graph of deviations of cylinder pressure from averaged pressure in quasi-periods is shown in figure 6.



Rys. 6. Przebieg odchyłek ciśnienia indykowanego od ciśnienia uśrednionego w pseudookresach sygnału i powiększenie części wykresu

Fig. 6. Graph of deviations of cylinder pressure from averaged pressure in quasi-periods of signal and an expansion of a fragment of graph

Very characteristic are large values of deviations of cylinder pressure from averaged pressure in quasi-periods of signal in the area of maximum pressure. It follows the fact, that for these ranges of crankshaft's angle of revolution maximum values of derivative occur for an angle which is smaller than the angle of maximum pressure, and minimum for the larger angle.

ryzowanego ciśnienia indykowanego dla wybranych pseudookresów (dla co dziesiątego pseudookresu). Na wykresie naniesiono również gęstość prawdopodobieństwa odchyłek ciśnienia indykowanego dla całej populacji, a także rozkład normalny dla zbioru standaryzowanego.

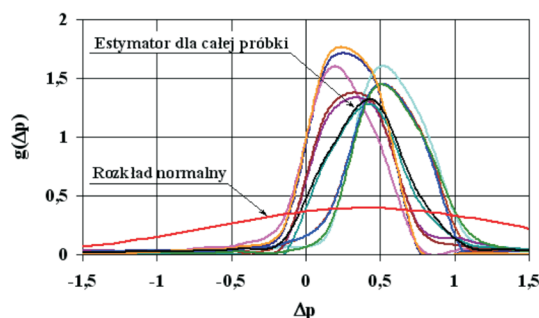
Przeprowadzono badania normalności dla jedenastu analizowanych próbek oraz dla całej populacji korzystając z testów Shapira–Wilka [2, 16], Kołmogorowa–Smirnowa [2, 10, 11, 17] i Lillieforsa [2, 12]. Wyniki testów przedstawione są w tabeli: statystyki testów – W i D oraz prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy o zgodności próbki z rozkładem normalnym – p. Do badania zgodności próbek z rozkładem normalnym wykorzystano oprogramowanie Statistica.

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono statystyki testów Shapira–Wilka i Kołmogorowa–Smirnowa oraz prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotez Shapira–Wilka, Kołmogorowa–Smirnowa i Lillieforsa o zgodności próbki z rozkładem normalnym. W wypadku testów Kołmogorowa–Smirnowa i Lillieforsa przedstawiono graniczne wartości i prawdopodobieństwa nieodrżucenia hipotez o zgodności próbki z rozkładem normalnym<sup>2)</sup>.

Negatywne wyniki testów normalności potwierdza porównanie gęstości prawdopodobieństwa badanych próbek oraz rozkładu normalnego (rysunek 7).

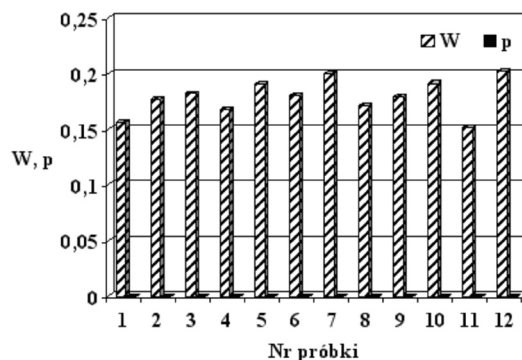
Z badań zgodności próbek z rozkładem normalnym odchyłek ciśnienia indykowanego dla wybranych pseudookresów wynika, że nie ma podstaw – na podstawie wykonanych testów: Shapira–Wilka, Kołmogorowa–Smirnowa i Lillieforsa, do przyjęcia na poziomie istotności 0,01 hipotezy o zgodności badanych próbek z rozkładem normalnym. Analiza wartości statystyk wykorzystywanych testów wskazuje na

After determining the values of deviations from average pressure for each point of registered course the graphs of probability density of deviations in quasi–period were estimated. In figure 7 the probability density for 12 deviations of



Rys. 7. Gęstość prawdopodobieństwa odchyłek standaryzowanego ciśnienia indykowanego dla wybranych pseudookresów i dla całej próbki

Fig. 7. Probability density of deviations of standardised cylinder pressure for selected quasi-periods and the whole population



Rys. 8. Statystyka testu Shapira–Wilka i prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotezy Shapira–Wilka o zgodności próbki z rozkładem normalnym

Fig. 8. Shapiro – Wilk's test's statistic and probability of non-rejection of S – W hypothesis regarding the sample conformity with a normal distribution

Tabela 1. Wyniki testów normalności odchyłek ciśnienia indykowanego  
Table 1. Tests results of normality of deviations of cylinder pressure

Numer próbki pseudookresu	Test Shapira–Wilka		Testy Kołmogorowa–Smirnowa i Lillieforsa		
	W	p	d	Test Kołmogorowa–Smirnowa p	Test Lillieforsa p
1	0,15574	2,36E-21	0,453561	p < ,01	p < ,01
2	0,177222	4,05E-21	0,427082	p < ,01	p < ,01
3	0,182189	4,60E-21	0,426572	p < ,01	p < ,01
4	0,167237	3,15E-21	0,450818	p < ,01	p < ,01
5	0,190412	5,69E-21	0,433129	p < ,01	p < ,01
6	0,180098	4,36E-21	0,439937	p < ,01	p < ,01
7	0,200411	7,37E-21	0,419872	p < ,01	p < ,01
8	0,170873	3,45E-21	0,449348	p < ,01	p < ,01
9	0,179434	4,29E-21	0,45686	p < ,01	p < ,01
10	0,191307	5,82E-21	0,449366	p < ,01	p < ,01
11	0,151821	2,14E-21	0,471685	p < ,01	p < ,01
Populacja	0,201905	7,67E-21	0,431062	p < ,01	p < ,01

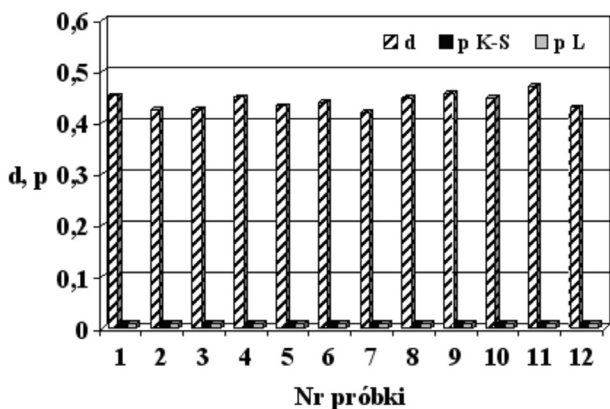
<sup>2)</sup> W oprogramowaniu Statistica dla testów Kołmogorowa–Smirnowa i Lillieforsa wyznaczane jest prawdopodobieństwa nieodrżucenia hipotez o zgodności próbki z rozkładem normalnym w postaci relacji w stosunku do granicznych wartości (w tym wypadku p < 0,01).

standardised cylinder pressure for selected quasi–periods (for every 10<sup>th</sup>) is presented. Probability density of deviations of cylinder pressure for the whole population and distribution for standardised set are also shown in the graph.

Normality tests for 11 analysed samples and the whole population were performed by using Shapiro – Wilk's test [2, 16], Kolomogorow – Smirnow's test [2, 10, 11, 17] and Lilliefors' test [2, 12]. Tests results are presented in the table: tests statistics – W and D and probability of non-rejection of the hypothesis regarding the conformity of the sample with a normal distribution – p. In order to examine the sample conformity with a normal distribution STATISTICA software was used.

Statistics of Shapiro–Wilk's test and Kołmogorow–Smirnow's test and probability of non-rejection of the Shapiro–Wilk's, Kołmogorow–Smirnow's and Lilliefors' hypotheses regarding the conformity of the sample with a normal

stacjonarność badanego procesu odchyłek ciśnienia indykowanego względem gęstości prawdopodobieństwa, bowiem współczynniki zmienności statystyk testów Shapira–Wilka i Kołmogorowa–Smirnowa należy uznać za nieduże (rysunek 10).



Rys. 9. Statystyka testu Kołmogorowa–Smirnowa i prawdopodobieństwo nieodrżucenia hipotez Kołmogorowa–Smirnowa (K–S) i Lillieforsa (L) o zgodności próbki z rozkładem normalnym

Fig. 9. Kolmogorow – Smirnow’s (K – S) test statistics and probability of non-rejection of K – S and Lilliefors’ (L) hypothesis of conformity sample with a normal distribution

Przeprowadzono również badania odchyłek ciśnienia indykowanego w dziedzinie częstotliwości oraz badania korelacji własnej. W tym celu usunięto z sygnału trend liniowy i dokonano standaryzacji badanych zbiorów. Do wyznaczenia widmowej gęstości mocy i funkcji korelacji własnej wykorzystano procedury z oprogramowania Statistica z zastosowaniem algorytmu szybkiego przekształcenia Fouriera z oknem Hamminga o szerokości 21 odstępów próbkowania w dziedzinie czasu. Do wygładzania zgrubnego q–elementowego wektora estymatora widmowej gęstości mocy zastosowano nierekurencyjny filtr w dziedzinie częstotliwości (tzw. uśrednianie odcinkowe w dziedzinie częstotliwości) [1, 13, 14]:

$$G_i = \frac{1}{2k + 1} \sum_{j=i-k}^{i+k} \tilde{G}_j,$$

$$\begin{aligned} k &= M && \text{dla} && M < i \leq q - M \\ k &= i - 1 && \text{dla} && i \leq M \\ k &= q - i && \text{dla} && i > q - M \end{aligned} \tag{5}$$

Do realizacji filtra przyjęto parametr  $M = 10$ .

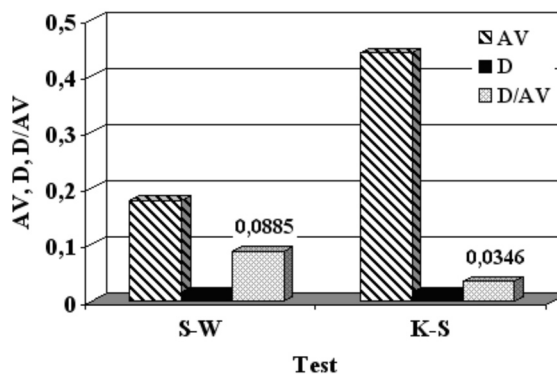
Na rysunku 11 przedstawiono widmową gęstość mocy, a na rysunku 12 funkcję korelacji własnej standaryzowanych odchyłek ciśnienia indykowanego.

Na podstawie analizy widmowej standaryzowanych odchyłek ciśnienia indykowanego można stwierdzić, że badany sygnał ma charakter szerokopasmowego szumu. Duża wartość widmowej gęstości mocy dla częstotliwości około 50 Hz wynika prawdopodobnie ze znacznych wartości odchyłek ciśnienia indykowanego sygnału w okolicach ciśnienia maksymalnego. Z analizy korelacyjnej wynika ponadto słabe skorelowanie sygnału.

distribution are shown in figures 8 and 9. In the case of Kołmogorow–Smirnow and Lilliefors’ tests boundary values and probability of non-rejection of the hypothesis of conformity sample with a normal distribution were presented<sup>2)</sup>.

Negative results of normality tests also confirm the comparison of probability density of examined samples with a normal distribution (figure 7).

On the basis of the conformity of the samples with a normal distribution research of deviations of the cylinder pressure for selected quasi–periods it can be concluded that (on the basis of performed tests) there is no reason to accept the hypothesis about conformity of the samples with a normal distribution on 0,01 confidence level. The analysis of the values of used tests statistics points out the stationarity of the analysed process of deviations of the cylinder pressure for the sake of probability density due to small values of S – W. K – S test changeability rate (figure 10).



Rys. 10. Wartość średnia, odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności statystyk testów Shapira–Wilka (S–W) i Kołmogorowa–Smirnowa (K–S)

Fig. 10. Mean value, standard deviation and changeability rate of Shapiro–Wilk’s (S–W) and Kolmogorow–Smirnow’s (K–S) tests statistic

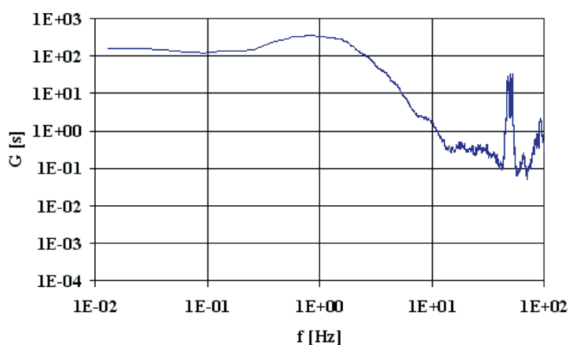
Research of deviation of cylinder pressure against frequency and research of autocorrelation were also performed. In order to do it, linear trend was eliminated from the signal and examined sets were standardised. Power density spectrum and function of autocorrelation were determined by STATISTICA software with the use of the FFT procedure with Hamming window (its width was 21 sampling steps in time domain). In order to initial smooth a vector of estimator of power density spectrum (q–elements size) an irrecurrent filter was used in the time domain (it is also called: serialized averaging in the time domain) [1, 13, 14].

$$G_i = \frac{1}{2k + 1} \sum_{j=i-k}^{i+k} \tilde{G}_j,$$

$$\begin{aligned} k &= M && \text{for} && M < i \leq q - M \\ k &= i - 1 && \text{for} && i \leq M \\ k &= q - i && \text{for} && i > q - M \end{aligned} \tag{5}$$

Parameter M value was set as  $M = 10$  to realise filter.

<sup>2)</sup> In STATISTICA software, for Kolmogorow – Smirnow’s and Lilliefors’ test probability of not rejecting hypothesis of sample conformity with a normal distribution is determined in correlation with border values (in this case  $p < 0,01$ ).



Rys. 11. Widmowa gęstość mocy standaryzowanych odchyłek ciśnienia indykowanego

Fig. 11. Power density spectrum of standardised deviations of cylinder pressure

## Podsumowanie

Na podstawie analizy sygnału ciśnienia indykowanego rejestrowanego w dziedzinie czasu stwierdzono znaczną nierównomierność tego sygnału, wynikającą z:

- nierównomierności prędkości obrotowej, co determinuje pseudookresowość badanego sygnału,
- zakłóceń wartości zarejestrowanych ciśnień indykowanych.

Nierównomierność analizowanego sygnału ciśnienia indykowanego jest tak znaczna, że metody zmniejszania udziału zakłóceń w podstawowym sygnale okresowym z wykorzystaniem przetwarzania sygnału w dziedzinie częstotliwości okazują się nieskuteczne. Metody takie umożliwiają skuteczne zmniejszanie udziału zakłóceń w podstawowym sygnale okresowym w wypadku sygnałów obejmujących znacznie mniejszą liczbę okresów [7, 8].

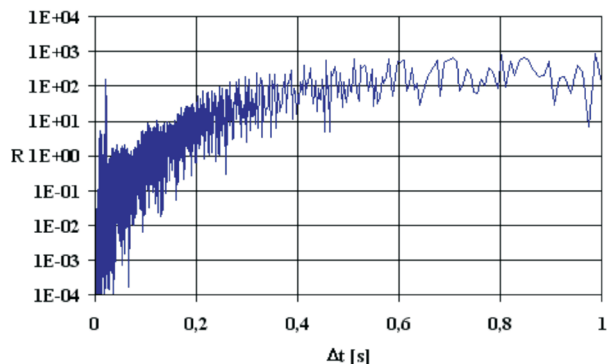
Metoda zastosowana do zmniejszania udziału zakłóceń w podstawowym sygnale okresowym z wykorzystaniem wtórnego próbkowania umożliwia przekształcenie zmiennej niezależnej z dziedziny czasu do dziedziny kąta obrotu wału korbowego. Uśrednianie synchroniczne tak przekształconego sygnału jest skutecznym sposobem zmniejszania udziału zakłóceń w sygnale podstawowym.

Odchyłki ciśnienia indykowanego od ciśnienia uśrednionego w pseudookresach wynikają z przyczyn nierównomierności sygnału ciśnienia indykowanego oraz z metody przetwarzania sygnału, w szczególności metody wtórnego próbkowania w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego. Specyficzna natura sygnału indykatorowego, znamienne występowaniem znacznych różnicowań wartości w okolicach ciśnienia maksymalnego i, w związku z tym, również znacznych wartości pochodnych ciśnienia względem zmiennej niezależnej, determinuje w istotny sposób właściwości badanych odchyłek. Odchyłki ciśnienia indykowanego od ciśnienia uśrednionego w pseudookresach mają charakter szerokopasmowego szumu o słabej korelacji własnej. Przeprowadzone testy normalności sygnału nie uprawniają do sformułowania hipotezy o zgodności badanego sygnału z rozkładem normalnym.

Istotnym wynikiem badania sygnału odchyłki ciśnienia indykowanego od ciśnienia uśrednionego w pseudookresach jest stwierdzenie stacjonarności tego sygnału względem gęstości prawdopodobieństwa.

Power density spectrum is presented in figure 11. Auto-correlation function of standardised deviations of cylinder pressure is shown on figure 12.

We can say that the analysed signal is a wide-range noise on the basis of a spectral analysis. High value of power density for frequency of 50 Hz is probably a result of high values of deviations of cylinder pressure signal in the area of maximum pressure value. Also a weak autocorrelation of signal follows the correlation analysis.



Rys. 12. Funkcja korelacji własnej standaryzowanych odchyłek ciśnienia indykowanego

Fig. 12. Autocorrelation function of standardised deviations of cylinder pressure

## Conclusion

On the basis of the analysis of cylinder pressure signal registered against time, large irregularity of this signal was determined. It is a result of:

- irregularity of crankshaft speed (that determines quasi-periodical character of analysed signal),
- distortions of registered values of cylinder pressure.

Due to large irregularity of the cylinder pressure basic signal common methods of analysing in the frequency domain are not effective. These methods enable eliminating distortions in the basic signal in case of much smaller number of periods [7, 8].

A method used in this research in order to eliminate the distortions from basic periodical signal that relies on the resampling data makes it possible to transform independent variable from the time domain to the crankshaft revolution angle domain. Synchronised averaging of a signal transformed in this way is an effective method of eliminating distortions from the basic signal.

Deviations of cylinder pressure signal from averaged pressure in quasi-periods are a result of the irregularity of cylinder pressure signal and the method of signal processing (especially resampling in crankshaft revolution angle domain). A specific nature of the cylinder pressure signal (large differences in areas of maximum pressure and large values of derivative) determines the character of the analysed deviations. Deviations of cylinder pressure from averaged pressure in quasi-periods are a kind of wide-range noise of weak autocorrelation. Performed normality tests don't allow formulating a hypothesis of conformity of the analysed signal with a normal distribution.

A significant result of this analysis is a statement of the stationarity of the signal according to probability density.



## Podziękowania

Autorzy składają podziękowania Panu kmdrowi prof. dro-  
wi hab. inż. Leszkowi Piasecznemu, dziekanowi Wydziału Me-  
chaniczno-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej w  
Gdyni za wyrażenie zgody na wykorzystanie wyników po-  
miarów.

Artykuł recenzowany

## Special thanks

Authors would like to thank Commander Professor Leszek  
Piaseczny, the dean of the Faculty of Mechanical–Electrical En-  
gineering of the Polish Naval University in Gdynia for giving his  
assent on use of the measurement results.

## Skróty i oznaczenia/Nomenclature:

AV	wartość średnia/average value
d	statystyka testu Kołmogorowa–Smirnowa/Kolmogorow–Smir- now test's statistic
D	odchylenie standardowe/standard deviation
G	widmowa gęstość mocy/power spectrum
l	liczba okresów zarejestrowanych podczas pomiarów/number of terms registered during measurements
L	numer kolejny okresu/term number
K	liczba punktów pomiaru/total number of measurements po- ints
n	prędkość obrotowa/engine speed
M	parametr filtra liniowego/linear filter's parameter
N	numer punktu pomiaru/number of measurement's point

p	prawdopodobieństwo/probability
$p_g$	ciśnienie indykowane po filtracji/cylinder pressure after filte- ring
$\tilde{P}_g$	ciśnienie indykowane otrzymane z pomiaru/raw cylinder pres- sure
q	wymiar wektora widmowej gęstość mocy/size of power spec- trum vector
r	parametr procedury Resample/parameter of Resample proce- dure
R	funkcja korelacji własnej/autocorrelation function
T	pseudookres/quasi-period
W	statystyka test Shapira–Wilka/Shapiro–Wilk test's statistic
$\Delta t$	odstęp próbkowania/sampling step

## Literatura/Bibliography

- [1] Bendat J.S., Piersol A.G.: Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych. PWN. Warszawa 1976.
- [2] Box G.E.P., Hunter W.G., Hunter J.S.: Statistics for experi-  
menters: An introduction to design, data analysis, and model  
building. John Wiley & Sons. New York 1978.
- [3] Chłopek Z.: Modelowanie procesów emisji spalin w warun-  
kach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych. Prace Nau-  
kowe. Seria „Mechanika” z. 173. Oficyna Wydawnicza Poli-  
techniki Warszawskiej. Warszawa 1999.
- [4] Chłopek Z.: On selected methods of numerical differentiation  
on the example of cylindrical pressure course differentiation.  
Journal of KONES. Gdańsk 2001.
- [5] Chłopek Z.: The subject of task explicitness in numerical diffe-  
rentiation. Journal of KONES. Gdańsk 2001.
- [6] Chłopek Z., Piaseczny L.: Badania statystycznych właściwo-  
ści silnika spalinowego w statycznych warunkach pracy. Ze-  
szyty Naukowe Akademii Marynarki Wojennej. (w druku).
- [7] Chłopek Z., Piaseczny L.: Badania procesów szybkozmien-  
nych zachodzących w silniku spalinowym. Zeszyty Nauko-  
we Akademii Marynarki Wojennej. (Praca w druku).
- [8] Chłopek Z., Piaseczny L.: The fluctuations of static states of  
marine combustion engines. Polish Maritime Research.  
(w druku).
- [9] Chłopek Z., Piaseczny L.: The statistics researchs of high fre-  
quency processes in marine combustion engines. Polish Mari-  
time Research. (w druku).
- [10] Fisz M.: Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka mate-  
matyczna. PWN. Warszawa 1967.
- [11] Kolmogorov A.: Confidence limits for an unknown distribu-  
tion function. Annals of Mathematical Statistics, 12 (1941).
- [12] Lilliefors H. W.: On the Kolmogorov–Smirnov test for norma-  
lity with mean and variance unknown. Journal of the American  
Statistical Association, 64 (1967).
- [13] Oppenheim A.V., Schaffer R.W.: Cyfrowe przetwarzanie sy-  
gnałów. WKŁ, Warszawa 1979.
- [14] Otnes R.K., Enochson L.: Analiza numeryczna szeregów cza-  
sowych. WNT, Warszawa 1978.
- [15] Polanowski S.: Detemination of the peak value of cylinder  
pressurerate by means of the follow-up approximation or  
basic splines. Machine Dynamics Problems 1999, Vol. 24,  
No. 4.
- [16] Shapiro S. S., Wilk M. B., Chen H. J.: A comparative study of  
various tests of normality. Journal of the American Statistical  
Association, 63 (1968).
- [17] Smirnov N. V.: Table for estimating the goodness of fit of  
empirical distributions. Annals of Mathematical Statistics, 19  
(1948).

\* Dr hab. inż. Zdzisław Chłopek – profesor na  
Wydziale Samochodów i Maszyn Roboczych  
Politechniki Warszawskiej.

Mr Zdzisław Chłopek D.Sc., Ph.D., M.E. – Profes-  
sor in the Faculty of Vehicles and Working Machi-  
nes at Warsaw University of Technology.



\*\* Piotr Stasiak – student Politechniki Warszaw-  
skiej (4 rok – Wydział Samochodów i Maszyn  
Roboczych).

Piotr Stasiak – student of Warsaw University of  
Technology (4<sup>th</sup> year, Faculty of Vehicles and Wor-  
king Machines).

