

Zdzisław Chłopek
Leszek Piaseczny

BADANIA STATYSTYCZNYCH WŁAŚCIWOŚCI SILNIKA SPALINOWEGO W STATYCZNYCH WARUNKACH PRACY

STRESZCZENIE

Zmienność statycznych warunków pracy silnika spalinowego w zakresie wyższych częstotliwości ma charakter szumów, wynikających ze zjawisk nieuwzględnianych w jawny sposób w programie badań oraz z właściwości układów pomiarów. Poznanie właściwości tych szumów obserwowanych sygnałów statycznych ma istotne znaczenie w procedurach wyznaczania reprezentatywnych wartości wielkości traktowanych jako statyczne i wolnozmiennie w warunkach nieuniknionych zakłóceń. Badania przeprowadzono w statycznych warunkach pracy silnika okrętowego Sulzer typu 6AL 20/24, określonych momentem obrotowym $M_e = 4,33 \text{ kN}\cdot\text{m}$ i prędkością obrotową $n = 660 \text{ min}^{-1}$. Do analiz wybrano wielkości charakteryzujące emisję zanieczyszczeń zawartych w spalinach w warunkach opisanych punktem pracy silnika: moment obrotowy, prędkość obrotową oraz stężenia tlenu węgla, węglowodorów i tlenków azotu. Badania przeprowadzono w dziedzinach: czasu, wartości procesu oraz częstotliwości. Stwierdzono, że badane przebiegi szumów, generowanych przez zjawiska nieuwzględniane w jawnej postaci w programie badań statycznych silnika spalinowego oraz przez układy pomiarów, mają w przeważającym zakresie charakter nieskorelowanych szerokopasmowych szumów normalnych. Wyniki badań uzasadniają m.in. zasadność uśredniania wyników pomiarów w warunkach statycznych oraz uśredniania synchronicznego w warunkach ustalonych.

WSTĘP

Sposób traktowania badanych wielkości jest zależny od intencji badacza [3, 4]. Zasada ta jest szczególnie istotna w wypadku wielkości obserwowanych w dziedzinie czasu: w zależności od rozpatrywanych zakresów częstotliwości te same procesy mogą być traktowane jako dynamiczne lub statyczne [2]. Silnik spalinowy charakteryzuje się cyklicznością pracy, w związku z czym zawsze istnieje

możliwość transformacji zmiennej niezależnej, jaką jest czas, w taki sposób, aby była możliwa analiza niektórych procesów pracy silnika jako ustalonych. Jednocześnie nieuniknione fluktuacje wielkości nieuwzględnianych w jawny sposób w programie badań powodują, że w nieograniczonym zakresie częstotliwości obserwowane sygnały zawsze mają charakter dynamiczny i – dodatkowo – niestabilny. Statyczne warunki pracy silnika są postulatem niezależności procesów od czasu w przyjętym zakresie częstotliwości, najczęściej odpowiadającym warunkom użytkowania silnika [2]. Zmienność tych warunków w czasie w zakresie wyższych częstotliwości ma charakter szumów, wynikających ze zjawisk nieuwzględnianych w jawny sposób w programie badań oraz z właściwości układów pomiarów [3, 4]. Poznanie właściwości tych wysokoczęstotliwościowych szumów obserwowanych sygnałów statycznych ma istotne znaczenie w procedurach wyznaczania reprezentatywnych wartości wielkości traktowanych jako statyczne i wolnozmiennie w warunkach nieuniknionych zakłóceń, znamienne dla procesów poznawczych [3, 4]. Tym problemom jest poświęcony niniejszy artykuł.

PRZYKŁADOWE BADANIA ZAREJESTROWANYCH PROCESÓW ZACHODZĄCYCH W SILNIKU SPALINOWYM

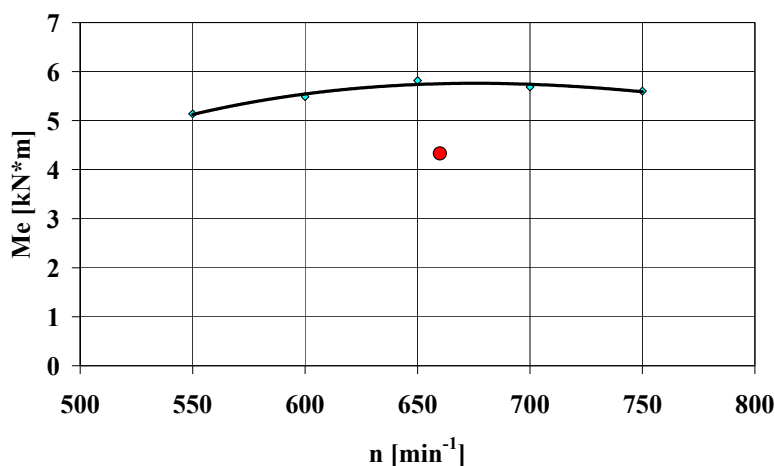
Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym sześciocyldrowego silnika okrętowego Sulzer typu 6AL 20/24 o objętości skokowej $37,7 \text{ dm}^3$, o mocy znamionowej 420 kW przy prędkości obrotowej 750 min^{-1} .

Badania przeprowadzono w statycznych warunkach pracy, tzn. takich, które w zakresie częstotliwości odpowiadających warunkom rzeczywistego użytkowania silnika są niezależne od czasu [2]. Procesy o częstotliwościach większych niż częstotliwości odpowiadające warunkom rzeczywistego użytkowania silnika są traktowane jako procesy szybkozmienne, a o częstotliwościach mniejszych – jako wolnozmiennie. Istnieje możliwość zróżnicowania interpretacji procesów szybkozmiennych, wolnozmiennych i procesów odpowiadających warunkom rzeczywistego użytkowania silnika ze względu na ich separację częstotliwościową. Procesy wolnozmiennie odgrywają w stosunku do procesów odpowiadających warunkom rzeczywistego użytkowania silnika rolę warunków początkowych, a procesy odpowiadające warunkom rzeczywistego użytkowania silnika mogą być traktowane w stosunku do procesów szybkozmiennych jako statyczne [2].

Dokładności pomiaru poszczególnych wielkości były zgodne z normą ISO 8178-2 i dla stosowanych zakresów wartości wynosiły: dla momentu obrotowego,

prędkości obrotowej $\pm 0,5\%$; dla stężeń tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu $\pm 1\%$.

Spośród badań przeprowadzonych w warunkach statycznych do analiz wybrano przykładowo procesy zachodzące w punkcie pracy silnika: $M_e = 4,33 \text{ kN}\cdot\text{m}$; $n = 660 \text{ min}^{-1}$ (rysunek 1.).



Rys. 1. Punkt badań pracy silnika na charakterystyce szybkościowej

W badaniach rejestrowano wielkości charakteryzujące pracę silnika, w tym właściwości energetyczne, ekologiczne i ekonomiczne oraz m.in. temperatury i natężenia przepływu czynnika chłodzącego i powietrza w układzie dolotowym. Do analiz w niniejszym artykule wybrano wielkości charakteryzujące emisję zanieczyszczeń zawartych w spalinach w warunkach opisanych punktem pracy silnika:

- moment obrotowy $M_e(t)$;
- prędkość obrotowa $n(t)$;
- stężenie tlenku węgla C–CO(t);
- stężenie węglowodorów C–HC(t);
- stężenie tlenków azotu C–NO_x(t).

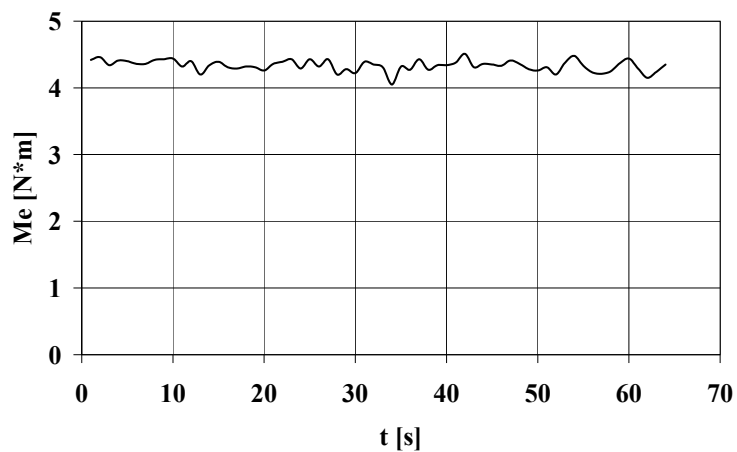
Sygnały zostały zarejestrowane w postaci cyfrowej z następującymi parametrami:

- czas próbkowania $\Delta t = 1 \text{ s}$;
- liczność próbek zbioru $N = 64$.

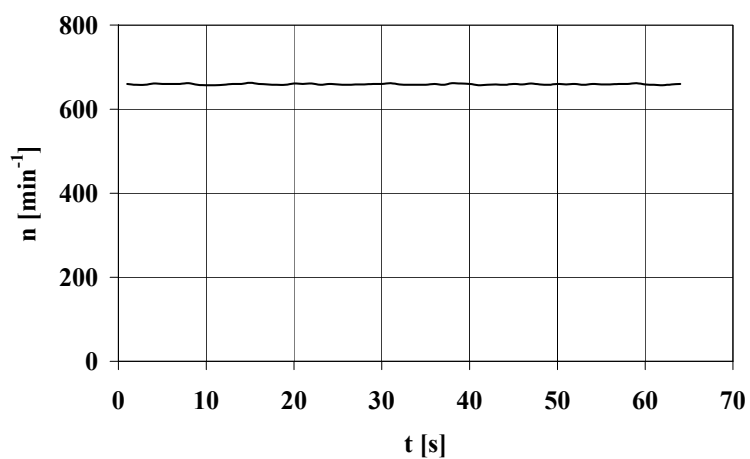
Analizy przeprowadzono w dziedzinach [2, 7, 8]:

- czasu;
- wartości procesu;
- częstotliwości.

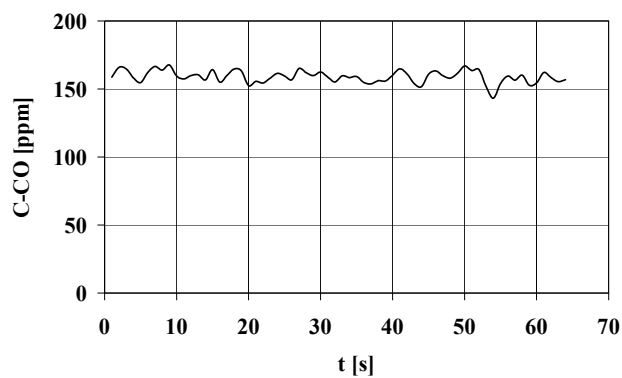
Zarejestrowane przebiegi przedstawiono na rysunkach 2 – 6.



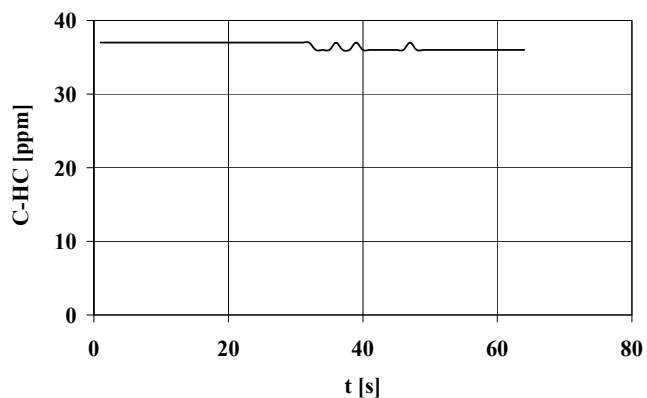
Rys. 2. Przebieg momentu obrotowego



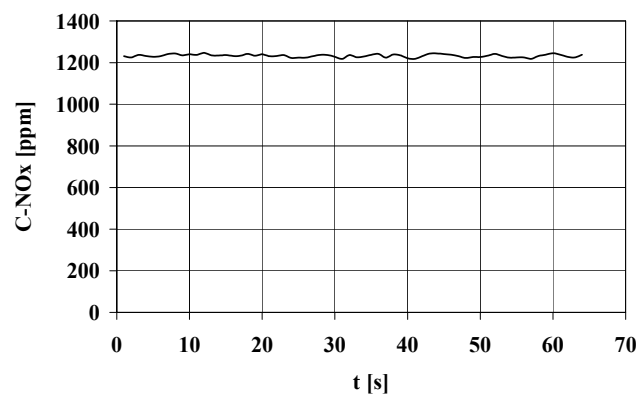
Rys. 3. Przebieg prędkości obrotowej



Rys. 4. Przebieg stężenia tlenku węgla

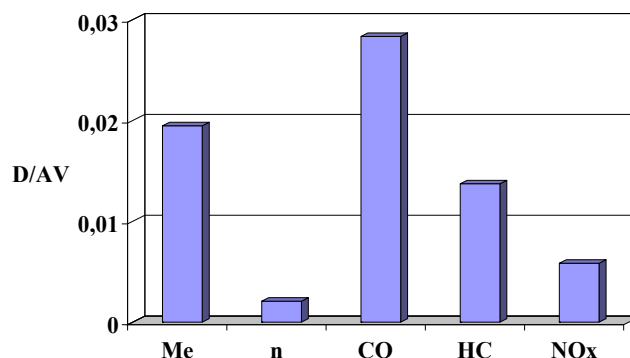


Rys. 5. Przebieg stężenia węglowodorów



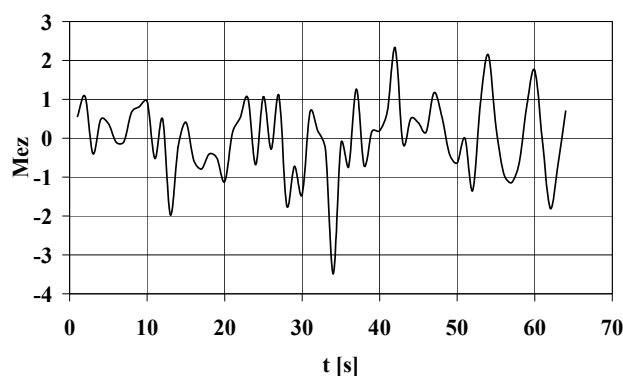
Rys. 6. Przebieg stężenia tlenków azotu

Na rysunku 7. przedstawiono stosunek odchylenia standardowego i wartości średniej zarejestrowanych przebiegów. Najmniejszym rozrzutem wartości charakteryzuje się przebieg prędkości obrotowej (0,002), co wynika przede wszystkim z inercyjnych właściwości układów mechanicznych silnika oraz stężenia tlenków azotu (0,006). Rozrzut wartości pozostałych jednostek jest porównywalny (0,014 ÷ 0,028).

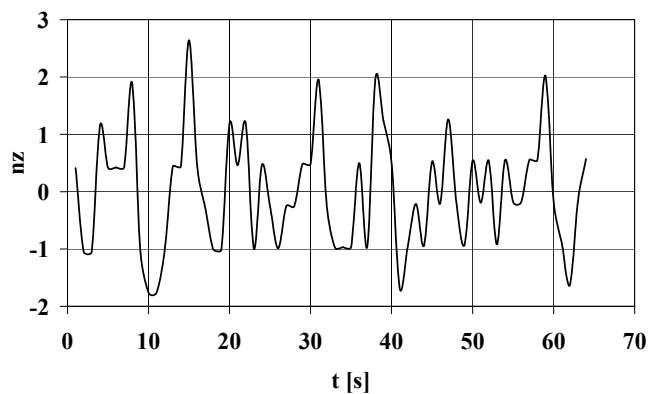


Rys. 7. Stosunek odchylenia standardowego i wartości średniej zbiorów wartości: momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz stężeń tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu

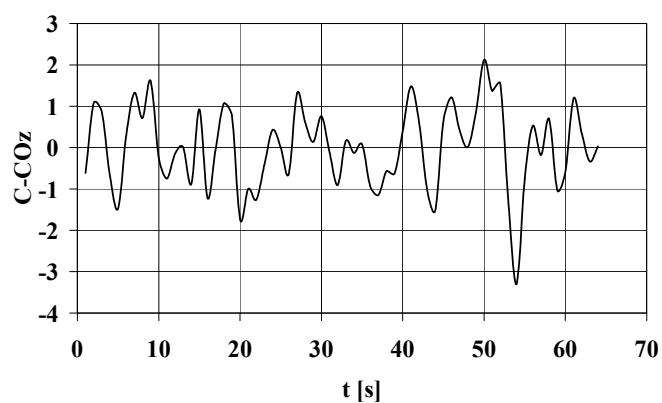
W celu prowadzenia kolejnych analiz przetworzono zarejestrowane sygnały: usunięto trendy liniowe oraz dokonano normalizacji zarejestrowanych przebiegów z usuniętymi trendami [7, 8]. Wyniki przetwarzania sygnałów zostały przedstawione na rysunkach 8 – 12.



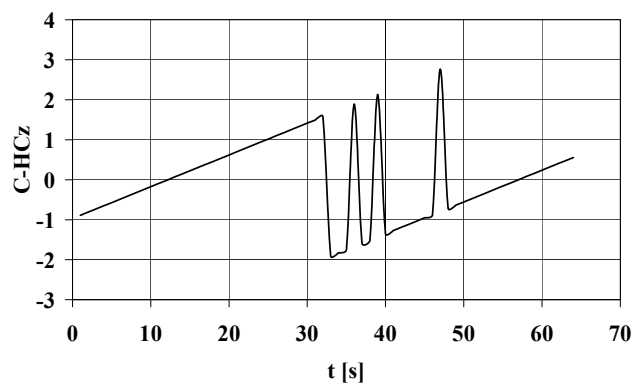
Rys. 8. Przebieg znormalizowanego momentu obrotowego



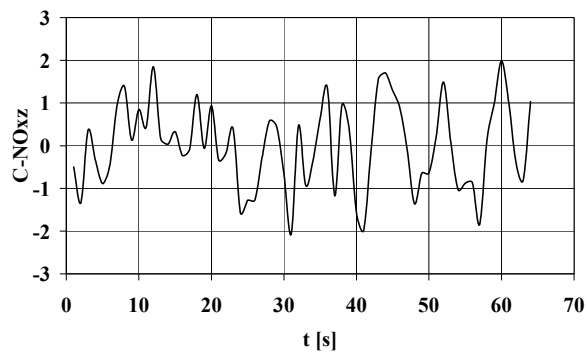
Rys. 9. Przebieg znormalizowanej prędkości obrotowej



Rys. 10. Przebieg znormalizowanego stężenia tlenku węgla

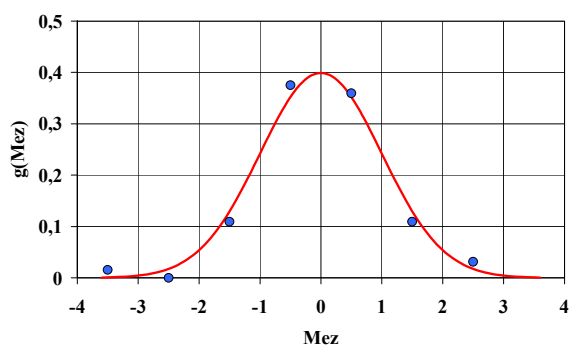


Rys. 11. Przebieg znormalizowanego stężenia węglowodorów

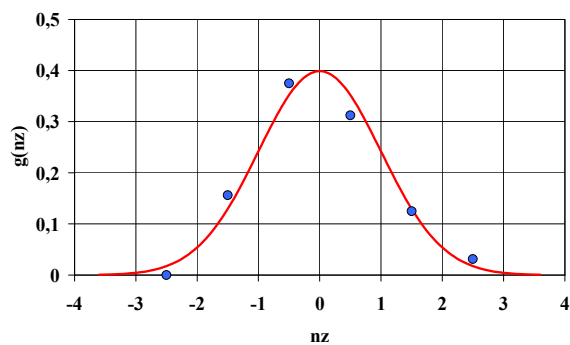


Rys. 12. Przebieg znormalizowanego stężenia tlenków azotu

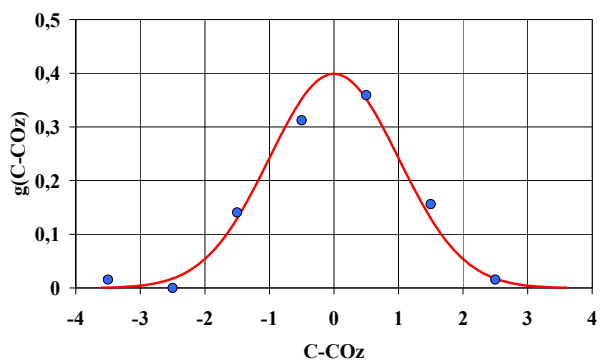
Dla znormalizowanych przebiegów wyznaczono gęstości prawdopodobieństwa. Na rysunkach 13 – 17 przedstawiono dyskretne gęstości prawdopodobieństwa oraz wyniki ich aproksymacji rozkładem normalnym.



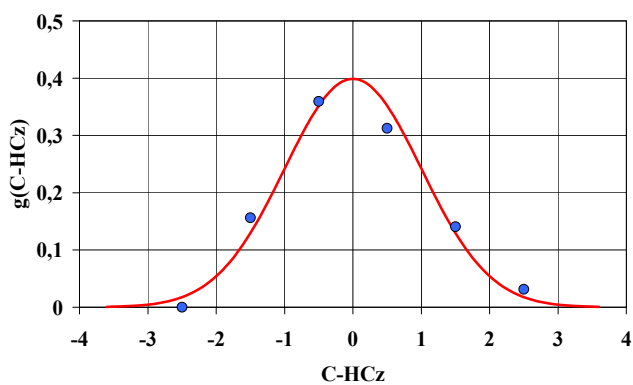
Rys. 13. Gęstość prawdopodobieństwa zbioru znormalizowanych wartości momentu obrotowego



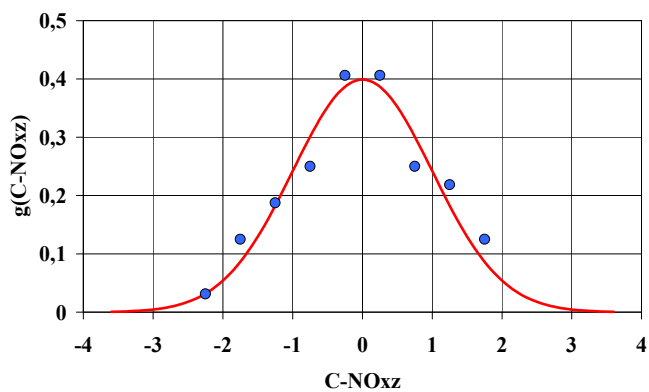
Rys. 14. Gęstość prawdopodobieństwa zbioru znormalizowanych wartości prędkości obrotowej



Rys. 15. Gęstość prawdopodobieństwa zbioru znormalizowanych wartości stężenia tlenku węgla

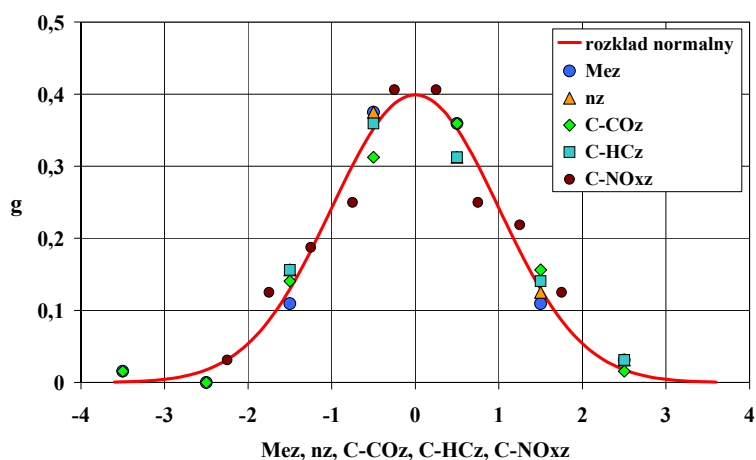


Rys. 16. Gęstość prawdopodobieństwa zbioru znormalizowanych wartości stężenia węglowodorów



Rys. 17. Gęstość prawdopodobieństwa zbioru znormalizowanych wartości stężenia tlenków azotu

Na rysunku 18. przedstawiono w postaci zbiorczej gęstość prawdopodobieństwa zbiorów znormalizowanych wartości: momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz stężeń tlenu węgla, węglowodorów i tlenków azotu.



Rys. 18. Gęstość prawdopodobieństwa zbiorów znormalizowanych wartości: momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz stężeń tlenu węgla, węglowodorów i tlenków azotu

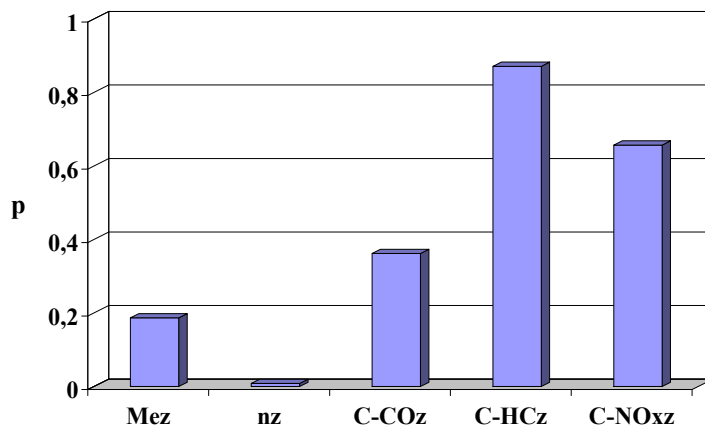
Przeprowadzono badania zgodności estymowanych rozkładów z rozkładem normalnym. Do oceny zgodności próbki z rozkładem normalnym zastosowano hipotezy:

- Shapira – Wilka [1, 10];
- Kołmogorowa – Smirnowa [1, 5, 11];
- Lillieforsa [1, 6];
- chi-kwadrat Pearsona [1, 9].

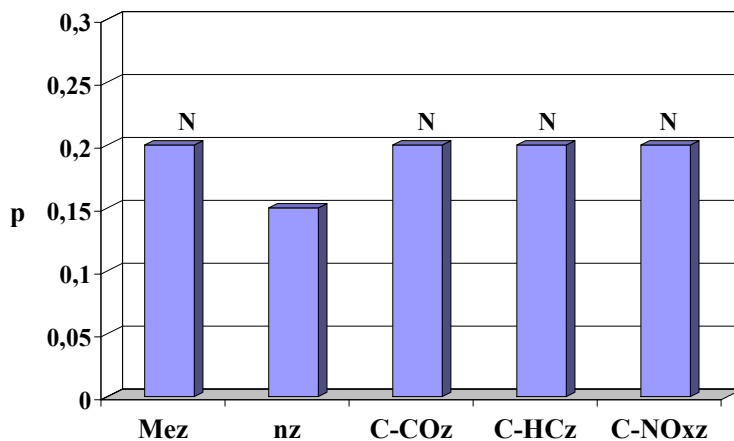
Wyniki badań zgodności próbki z rozkładem normalnym przedstawiono na rysunkach 19 – 22.

Do testowania zgodności estymowanych rozkładów z rozkładem normalnym wykorzystano oprogramowanie Statistica 6.1 firmy StatSoft Inc. Oprogramowanie to umożliwia m.in. wyznaczenie prawdopodobieństwa nieodrzućenia hipotezy Shapira – Wilka o zgodności próbki z rozkładem normalnym, natomiast w wypadku hipotez Kołmogorowa – Smirnowa oraz Lillieforsa są wyznaczane jedynie wartości progowe, kwalifikujące je do kategorii nieistotnych ze względu na obliczoną wartość statystyki. Jako kryterium nieistotności statystyki przyjęto w oprogramowaniu

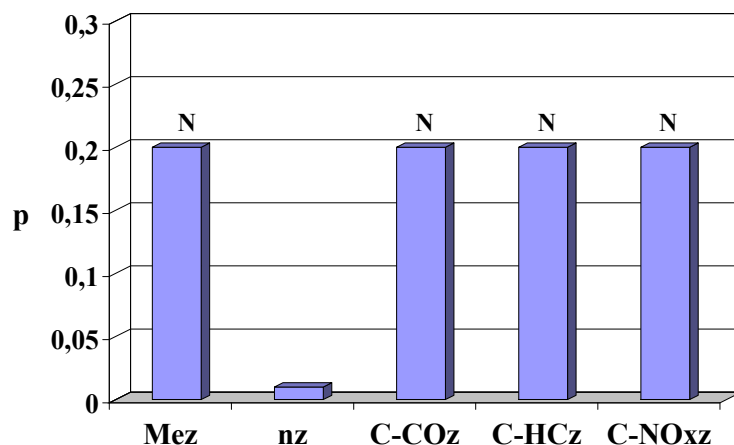
Statistica 6.1 prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy równe 0,2. Na wykresach nieistotność statystyki jest oznaczona literą „N”. W wypadku hipotezy chi-kwadrat Pearsona jest wyznaczone prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o dopasowaniu do rozkładu normalnego.



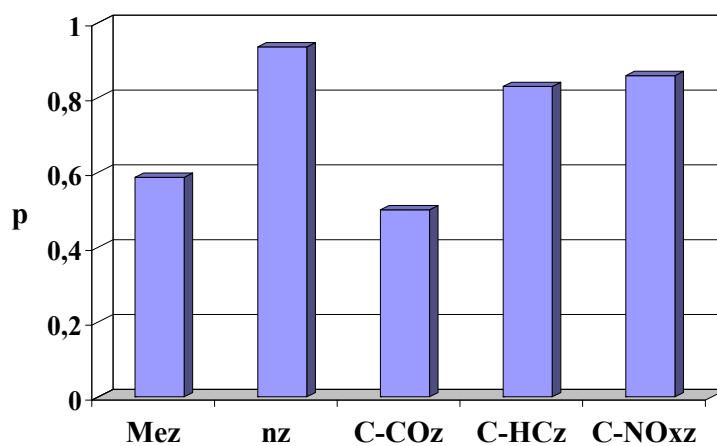
Rys. 19. Prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy Shapira – Wilka o zgodności próbki z rozkładem normalnym



Rys. 20. Prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy Kołmogorowa – Smirnowa o zgodności próbki z rozkładem normalnym



Rys. 21. Prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy Lillieforsa o zgodności próbki z rozkładem normalnym



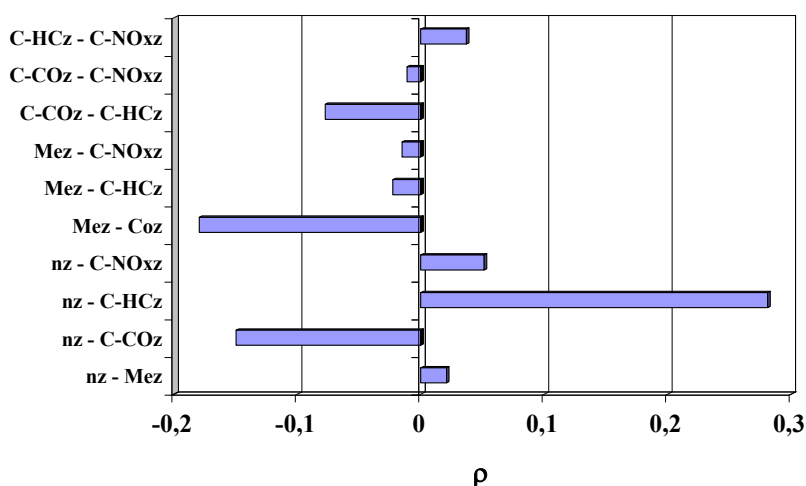
Rys. 22. Prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy chi-kwadrat Pearsona o dopasowaniu do rozkładu normalnego

Wyniki uzyskane w testach Kołmogorowa – Smirnowa oraz Lillieforsa są zgodne: nie ma podstaw do odrzućenia hipotezy o zgodności estymowanych gęstości prawdopodobieństwa z rozkładem normalnym w wypadku zbiorów znormalizowanych wartości: momentu obrotowego oraz stężeń tlenu węgla, węglowodorów i tlenków azotu. Testy Kołmogorowa – Smirnowa oraz Lillieforsa mają tę samą statystykę, różnią się jedynie traktowaniem wartości średniej oraz wariancji: w wypadku testu Lillieforsa jako estymat tych wielkości, a nie danych a priori, jak ma to

miejsce w wypadku testu Kołmogorowa – Smirnowa [1]. Również na podstawie testu Shapira – Wilka są potwierdzone te wnioski: jedynie w wypadku procesu znormalizowanej prędkości obrotowej wartość prawdopodobieństwa odrzucenia hipotezy o zgodności gęstości prawdopodobieństwa z rozkładem normalnym jest znikomo mała (0,008). Wyników analizy hipotez o zgodności wyznaczonych gęstości prawdopodobieństwa z rozkładem normalnym nie potwierdzają wyniki testu chi-kwadrat Pearsona, jednak test ten dotyczy jedynie hipotezy o dopasowaniu do rozkładu normalnego, a nie zgodności z nim.

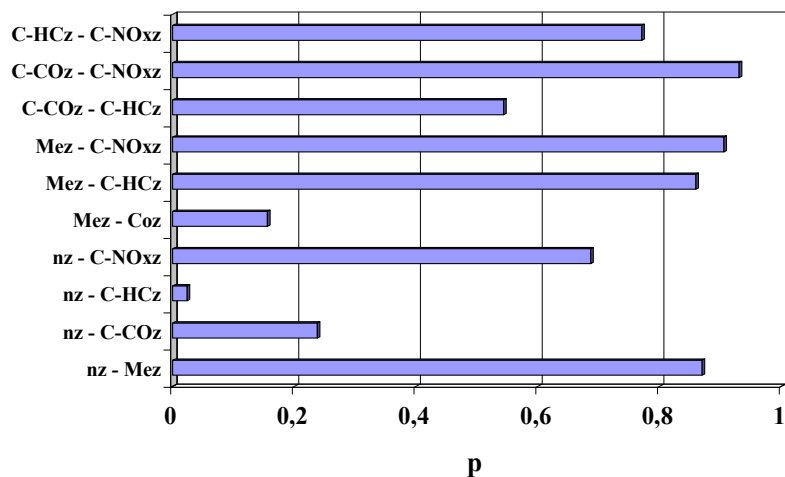
Za najbardziej wiarygodne przyjmuje się wyniki uzyskane w teście Shapira – Wilka, ponieważ charakteryzuje się on największą mocą spośród wszystkich rozpatrywanych [1, 10].

Przeprowadzono również badania korelacji liniowej rozpatrywanych zbiorów [1, 7 – 9]. Na rysunku 23. przedstawiono współczynniki korelacji liniowej Pearsona między parami poszczególnych zbiorów.



Rys. 23. Współczynniki korelacji liniowej Pearsona zbiorów znormalizowanych wartości: momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz stężeń tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu

Stwierdza się niewielką korelację liniową między poszczególnymi zbiorami, charakteryzującą się wartościami współczynnika korelacji liniowej Pearsona mniejszymi od 0,3. Praktyczny brak korelacji między poszczególnymi zbiorami potwierdzają wartości prawdopodobieństwa nieodrżucenia hipotezy o braku korelacji liniowej zbiorów (rysunek 24.), może z wyjątkiem pary zbiorów wartości znormalizowanych: prędkość obrotowa – stężenie węglowodorów, co nie znajduje uzasadnienia merytorycznego.



Rys. 24. Prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji liniowej zbiorów znormalizowanych wartości: momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz stężeń tlenu węgla, węglowodorów i tlenków azotu

Przeprowadzono również badania znormalizowanych przebiegów w dziedzinie częstotliwości. Czas obserwacji próbek zbioru wynosi

$$T = N \cdot \Delta t, \quad (1)$$

zatem częstotliwość Nyquista jest równa

$$f_g = \frac{1}{2 \cdot \Delta t}, \quad (2)$$

natomiast rozdzielczość częstotliwości wynosi

$$f_d = \frac{1}{T} = \frac{1}{N \cdot \Delta t}. \quad (3)$$

Do analiz wprowadzono pojęcie częstotliwości względnej

$$f = \frac{\varphi}{\varphi_0}, \quad (4)$$

gdzie: φ – argument prostego przekształcenia Fouriera przebiegu czasowego;
 $\varphi_0 = 1 \text{ Hz}$.

Do wyznaczania zgrubnego estymatora widmowej gęstości mocy zastosowano algorytm szybkiego przekształcenia Fouriera (FFT) z oknem czasowym Hamminga [7, 8].

Do wygładzania zgrubnego estymatora widmowej gęstości mocy $N/2$ -elementowych wektorów

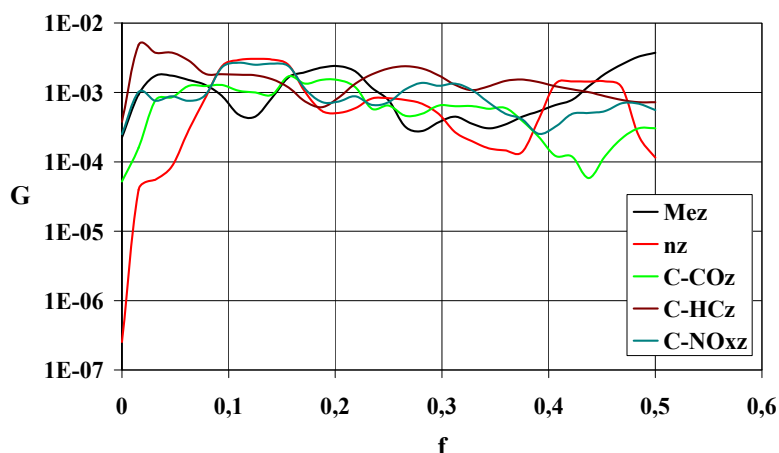
$$\tilde{\mathbf{G}} = [\tilde{G}_1, \tilde{G}_2, \dots, \tilde{G}_N]^T \quad (5)$$

stosowano nierekurencyjny filtr w dziedzinie częstotliwości (tzw. uśrednianie od-cinkowe w dziedzinie częstotliwości) [7, 8]

$$G_i = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=i-k}^{i+k} \tilde{G}_j \quad \begin{matrix} k = M & \text{dla} & M < i \leq N/2 - M \\ k = i - 1 & \text{dla} & i \leq M \\ k = N/2 - i & \text{dla} & i > N/2 - M \end{matrix} \quad (6)$$

Do realizacji filtra przyjęto parametr $M = 2$.

Na rysunku 25. przedstawiono widmową gęstość mocy znormalizowanych przebiegów.



Rys. 25. Widmowa gęstość mocy przebiegów znormalizowanych: momentu obrotowego, prędkości obrotowej oraz stężeń tlenku węgla, węglowodorów i tlenków azotu w dziedzinie częstotliwości względnej

Badane sygnały mają charakter szerokopasmowych (w zakresie obserwowanych częstotliwości) nieskorelowanych szumów.

KOMENTARZ

Badane przebiegi szumów, generowanych przez zjawiska nieuwzględniane w jawnej postaci w programie badań statycznych silnika spalinowego oraz przez układy pomiarów, mają w przeważającym zakresie charakter nieskorelowanych szerokopasmowych szumów normalnych. Ogólność tych wniosków osłabiają ograniczenia wynikające ze wstępnego charakteru badań. Najważniejszymi z tych ograniczeń są:

- stosunkowo mała częstotliwość próbkowania ograniczająca górną graniczną częstotliwość sygnałów obserwowanych;
- mała liczność próbek (64) ograniczająca rozdzielczość częstotliwościową sygnałów i – w związku z tym – dokładność estymacji widmowej gęstości mocy; mała liczność próbek ma również wpływ na dokładność estymacji gęstości prawdopodobieństwa;
- nieuwzględnianie w analizach wyników badań w innych punktach pracy silnika, co umożliwiłoby uogólnienie formułowanych wniosków.

Ostatnie z tych ograniczeń ma charakter wyłącznie techniczny. Autorzy dysponują również wynikami badań silnika w innych punktach pracy, a ich analiza potwierdza sformułowane wnioski. Wyniki tych badań nie zostały przedstawione wyłącznie z powodu ograniczonej objętości pracy.

Podjęte badania statystycznych właściwości silnika spalinowego w statycznych warunkach pracy mają charakter wstępny, mimo to ich wyniki mają znaczenie nie tylko teoretyczne, ale i praktyczne, bowiem tłumaczą m.in. zasadność uśredniania wyników pomiarów w warunkach statycznych oraz uśredniania synchronicznego w warunkach ustalonych.

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

AV	– wartość średnia
C-CO	– stężenie tlenku węgla
C-COz	– znormalizowane stężenie tlenku węgla z usuniętym trendem liniowym
C-HC	– stężenie węglowodorów
C-HCz	– znormalizowane stężenie węglowodorów z usuniętym trendem liniowym
C-NOx	– stężenie tlenków azotu

C–NO _x	– znormalizowane stężenie tlenków azotu z usuniętym trendem liniowym
D	– odchylenie standardowe
f	– częstotliwość względna
f _d	– rozdzielczość częstotliwości
f _g	– częstotliwość Nyquista
g	– gęstość prawdopodobieństwa
G	– widmowa gęstość mocy
\tilde{G}	– zgrubny estymator widmowej gęstości mocy
Me	– moment obrotowy
Mez	– znormalizowany moment obrotowy z usuniętym trendem liniowym
N	– liczność próbek zbioru
n	– prędkość obrotowa
nz	– znormalizowana prędkość obrotowa z usuniętym trendem liniowym
p	– prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy
T	– czas obserwacji próbek zbioru
t	– czas
Δt	– czas próbkowania
φ	– argument prostego przekształćenia Fouriera przebiegu czasowego $\varphi_0 = 1 \text{ Hz}$
ρ	– współczynnik korelacji liniowej Pearsona

Słowa kluczowe:

silnik spalinowy, warunki statyczne, statystyka, szumy szerokopasmowe, szumy nieskorelowane

BIBLIOGRAFIA

- [1] Box G. E. P., Hunter W. G., Hunter J. S., *Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis, and model building*, John Wiley & Sons, New York 1978.
- [2] Chłopek Z., *Modelowanie procesów emisji spalin w warunkach eksploatacji trakcyjnej silników spalinowych*, prace naukowe, seria „Mechanika”, z. 173, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [3] Chłopek Z., Piaseczny L., *O roli modelowania w badaniach naukowych*, „Zeszyty Naukowe” Akademii Marynarki Wojennej, 2001, nr 2, Gdynia.

- [4] Chłopek Z., Piaseczny L., *Remarks about the modelling in science researches*, „Eksplatacja i Niezawodność”, 2001, nr 4.
- [5] Kolmogorov A., *Confidence limits for an unknown distribution function*, „Annals of Mathematical Statistics”, 12 (1941).
- [6] Lilliefors H. W., *On the Kolmogorov – Smirnov test for normality with mean and variance unknown*, „Journal of the American Statistical Association”, 64 (1967).
- [7] Oppenheim A. V., Schafer R. W., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, WKiŁ, Warszawa 1979.
- [8] Otnes R. K., Enochson L., *Analiza numeryczna szeregów czasowych*, WNT, Warszawa 1978.
- [9] Pearson K., *On the theory of contingency and its relation to association and normal correlation*, Drapers' Company Research Memoirs, „Biometric”, 1904, ser. I.
- [10] 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).
- [11] Smirnov N. V., *Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions*, „Annals of Mathematical Statistics”, 19 (1948).

ABSTRACT

Changeability in static work conditions of an internal combustion engine for higher frequencies appears as noises resulting from phenomena which are not taken into account in an explicit way in the investigation program or from properties of measurement systems. To discover the properties of the noises in the statistic signals being observed is important for procedures used to determine representative values of magnitudes treated as static and free-changeable in the conditions of unavoidable disturbances. The investigations were carried out for static work conditions of Sulzer 6AL 20/24 engine, for torque $M_e = 4,33 \text{ kN}\cdot\text{m}$ and rotational speed $n = 660 \text{ min}^{-1}$. To do analyses, selected were magnitudes characterizing pollution emission contained in exhaust gases in conditions described with engine work point: torque, rotational speed, carbon dioxide concentration, hydrocarbons and nitrogen oxides. The investigations were carried out for time, values of process and frequencies. It was found out that the distribution of the noises investigated, generated by the phenomena not taken into account in the explicit way in the in the investigation program or from properties of measurement systems are mainly of uncorrelated wideband normal noises character. The results of the investigations justify averaging the measurement results in statistical conditions or synchronic averaging in fixed conditions.

Recenzent prof. dr hab. inż. Marek Orkisz