

Zdzisław Chłopek
Leszek Piaseczny

BADANIA PROCESÓW SZYBKOSMIENNYCH ZACHODZĄCYCH W SILNIKU SPALINOWYM

STRESZCZENIE

Badania procesów szybkozmiennych w stosunku do procesów o właściwościach dynamicznych charakterystycznych dla typowych warunków użytkowania urządzeń sprawiają liczne problemy metodologiczne. Typowym obiektem, w którego opisie występują takie problemy, jest silnik spalinowy. W pracy przedstawiono podstawowe trudności związane z badaniami procesów szybkozmiennych występujących w silniku spalinowym na przykładzie procesów ciśnienia indykowanego oraz ciśnienia wtrysku paliwa do cylindra. Analizowano właściwości dynamiczne badanych procesów oraz rozpatrywano problemy uśredniania synchronicznego sygnałów pseudookresowych w celu ograniczenia udziału szumów wysokoczęstotliwościowych w sygnale użytecznym. Stwierdzono ograniczenia skuteczności zmniejszania eliminacji szumów wysokoczęstotliwościowych z badanych sygnałów.

WSTĘP

Badania procesów szybkozmiennych w stosunku do procesów o właściwościach dynamicznych charakterystycznych dla typowych warunków użytkowania urządzeń sprawiają liczne problemy metodologiczne. Jest to szczególnie istotnie w związku ze znacznym stopniem niewiedzy na temat zakłóceń tych procesów, związanych z układami pomiarów oraz z występowaniem w rzeczywistym obiekcie badań czynników nieuwzględnianych w jawny sposób w programie badań. Typowym obiektem, w którego opisie występują takie problemy, jest silnik spalinowy [2 – 5].

Procesy występujące w silniku spalinowym można sklasyfikować ze względu na ich właściwości dynamiczne oraz rolę, jaką odgrywają w pracy silnika [2]:

- procesy związane z poszczególnymi cyklami pracy silnika oraz procesy szybkozmienne w stosunku do procesów charakterystycznych dla typowego użytkownika silnika;
- procesy związane z typowym użytkowaniem silnika;
- procesy związane z eksploatacyjnym zużyciem się silnika (trybologiczne) oraz procesy wolnozmiennie w stosunku do procesów charakterystycznych dla typowego użytkownika silnika.

Pierwsza grupa procesów obejmuje wszystkie procesy związane z obiegiem silnika. Można do niej zaliczyć również procesy nie zawsze całkowicie związane z cyklicznością pracy silnika, choć najczęściej generowane przez nią, np. drgania elementów silnika. Częstotliwości charakterystyczne¹ tych procesów muszą być co najmniej o rząd wielkości większe od częstotliwości cykli pracy silnika, jako że zachodzą one w czasie odpowiadającym częściom pojedynczych cykli [2].

Procesy charakterystyczne dla typowego użytkownika silnika są związane z eksploatacyjnymi wymuszeniami oddziałującymi na silnik. Podstawowymi wymuszeniami trakcyjnymi są procesy: sterowania silnika przez operatora i obciążenia ze strony odbiornika mocy. Reakcją odbiornika mocy jest prędkość wykonywania przezeń zadań, a silnika – prędkość obrotowa. Na podstawie analiz tych procesów można stwierdzić, że częstotliwości charakterystyczne procesów związanych z typowym użytkowaniem silnika są zawarte z dużym zapasem bezpieczeństwa w przedziale (0,01 – 10) Hz [2].

Procesy wolnozmiennie w stosunku do procesów związanych z typowym użytkowaniem silnika mają zupełnie odmienny charakter dynamiczny. Do kategorii procesów wolnozmiennych można zaliczyć procesy cieplne charakteryzujące stan cieplny silnika, opisany zbiorem temperatur części i układów silnika. Procesy te mają stałe czasowe rzędu kilku lub kilkunastu minut, a co najmniej kilkudziesięciu sekund. Procesami jeszcze bardziej wolnozmiennymi niż cieplne są procesy opisujące warunki atmosferyczne, tym bardziej zaś procesy trybologiczne związane ze zużyciem się silników [2].

W silniku spalinowym jest znamienne, ze względu na jego zasadę pracy, że procesy szybkozmienne, w szczególności związane z cyklami pracy, są pseudookresowe. Pseudookresowość a nie

¹ Pod umownym pojęciem „częstotliwości charakterystycznych” przyjmuje się zakres wartości częstotliwości, dla których amplitudy częstotliwościowej reprezentacji procesu mają znaczące wartości, arbitralnie przyjęte przez badacza (niekiedy zwyczajowo uznawane przez środowisko jako obowiązujące) [2].

okresowość tych procesów wynika: po pierwsze z faktu, że funkcja okresowa jest określona dla nieograniczonego zbioru zmiennej niezależnej, a po drugie, że badane procesy są realne. Ze względu na właściwość pseudookresowości procesów związanych z poszczególnymi cyklami pracy silnika wysokoczęstotliwościowe zakłócenia sygnałów można modelować jako zakłócenia amplitudy oraz zmiennej niezależnej. Zmienną niezależną są w tym wypadku zazwyczaj:

- czas – t ;
- kąt obrotu wału korbowego – φ .

Niech $x(t)$ będzie badanym sygnałem pseudookresowym, takim że:

$$|x(t) - x(t + k \cdot T)| < \varepsilon, \quad (1)$$

gdzie: $k = 1, 2, \dots, N$;

$\varepsilon > 0$;

T – wielkość estymowana jako pseudookres badanego sygnału.

Niedokładność ε jest zależna zatem od:

- amplitud szumów wysokoczęstotliwościowych;
- charakterystyk zbioru kolejnych pseudookresów $\{T_i\}$, gdzie $i = 1, 2, \dots, N - 1$.

Synchroniczne uśrednianie [11, 12] sygnału $x(t)$ polega na wyznaczeniu funkcji

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(t + j \cdot T). \quad (2)$$

Przy założeniu, że elementy zbioru $\{T_i\}$ mają stałe wartości oraz dla pewnej klasy procesów opisujących szumy wysokoczęstotliwościowe, np. procesów normalnych, synchroniczne uśrednianie sygnału umożliwia – zgodnie z prawami wielkich liczb (nierówność Cebyszewa, prawa Markowa i Chinczina [1, 8]) – znaczne ograniczenie udziału szumów wysokoczęstotliwościowych w sygnale użytecznym:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} [\bar{x}(t) - x(t)] = 0. \quad (3)$$

Najpoważniejszymi ograniczeniami skuteczności synchronicznego uśredniania sygnałów są problemy dotyczące: wyznaczania pseudookresu badanego sygnału oraz właściwości zbioru poszczególnych pseudookresów.

W wypadku cyfrowego przetwarzania sygnału dokładność estymacji pseudookresu zależy od [2, 3]:

- rozdzielczości kwantowania sygnału, co determinuje dokładność wyznaczania wartości zmiennej niezależnej;
- częstotliwości próbkowania, determinującej częstotliwość Nyquista obserwowanego sygnału;
- czasu obserwacji sygnału, decydującego o rozdzielczości częstotliwościowej obserwowanego sygnału.

Wpływ częstotliwości próbkowania na dokładność estymacji pseudookresu pozostaje jedynie teoretyczny, bowiem jest tylko wymagane, aby częstotliwość próbkowania była co najmniej dwukrotnie większa niż częstotliwość odpowiadająca oczekiwanej wartości pseudookresu. W celu uzyskania małej niedokładności estymatora pseudookresu konieczne jest stosowanie dużej rozdzielczości kwantowania oraz długich czasów obserwacji [2, 3]. Spełnienie tych warunków bywa niekiedy w rzeczywistości trudne, np. gdy wpływ warunków nieuwzględnianych w jawny sposób w programie badań ma wpływ na kwalifikacje procesów jako stacjonarnych – w takim wypadku zwiększenie czasu obserwacji może uniemożliwić kwalifikowanie procesu jako stacjonarnego.

Drugie ograniczenie skuteczności synchronicznego uśredniania sygnałów zależy od tego, jak duże są odchyłki wartości poszczególnych pseudookresów od wartości estymowanej jako reprezentatywna dla badanego sygnału. W wypadku odchyłek zbyt dużych synchroniczne uśrednianie sygnału może prowadzić do znacznego ograniczenia ilości informacji o sygnale użytecznym, a więc – w istocie – generowania dodatkowych szumów, zamiast ograniczenia szumów w badanym sygnale (jest oczywiste, że każde przetwarzanie sygnału w nieunikniony sposób przyczynia się zawsze do generowania szumów [2, 3]).

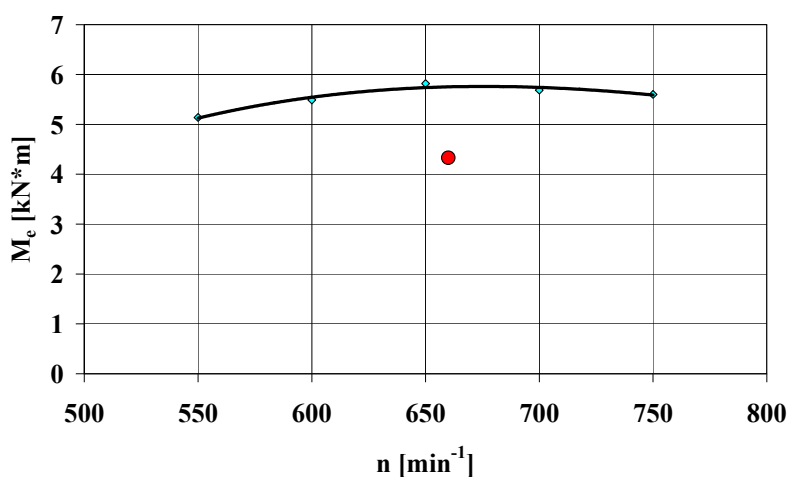
Skuteczną poprawę jakości synchronicznego uśredniania sygnałów pseudookresowych zachodzących w silniku spalinowym można uzyskać dzięki próbkowaniu sygnału w dziedzinie kąta obrotu wału korbowego, a nie w dziedzinie czasu [2, 3]. Unika się dzięki temu wpływu fluktuacji prędkości obrotowej na skuteczność synchronicznego uśredniania sygnałów.

BADANIA PROCESÓW CIŚNIENIA INDYKOWANEGO I CIŚNIENIA WTRYSKU

W pracy przedstawiono podstawowe problemy związane z badaniami procesów szybkozmiennych występujących w silniku spalinowym na przykładzie procesów ciśnienia indykowanego oraz ciśnienia wtrysku paliwa do cylindra.

Badania zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym sześciocy-lindrowego 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]. Na rysunku 1. przedstawiono punkt pracy silnika, w którym wykonano pomiary.



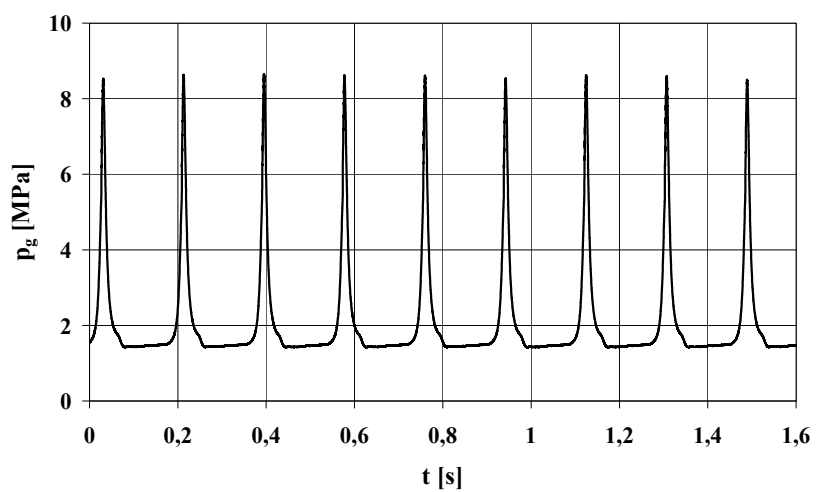
Rys. 1. Punkt badań pracy silnika na charakterystyce szybkościowej

Do badań sygnałów skwantowanych przetwornikiem 12-bitowym i zarejestrowanych z odstępem próbkowania $\Delta t = 50 \mu\text{s}$ wykorzystano zbiory każdy o liczności $m = 32\,000$.

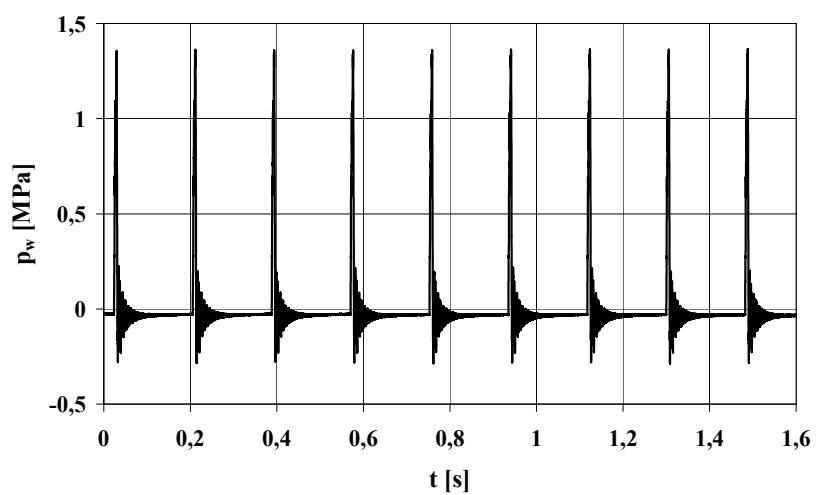
Analizy przeprowadzono w dziedzinach [2, 11, 12]:

- czasu;
- wartości procesu;
- częstotliwości.

Zarejestrowane sygnały przedstawiono na rysunkach 2. i 3.

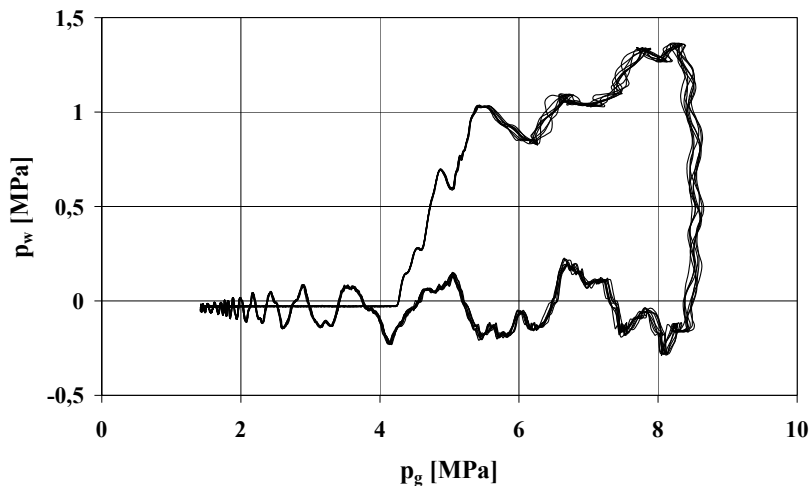


Rys. 2. Przebieg ciśnienia indykowanego

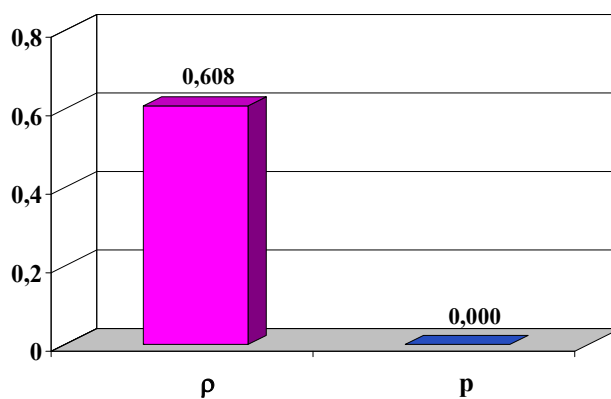


Rys. 3. Przebieg ciśnienia wtrysku

Na rysunku 4. przedstawiono korelacyjną zależność procesów ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona [1, 13] wynosi 0,608, w związku z czym nie ma podstaw odrzucenia hipotezy o braku korelacji liniowej analizowanych sygnałów (rysunek 5.).

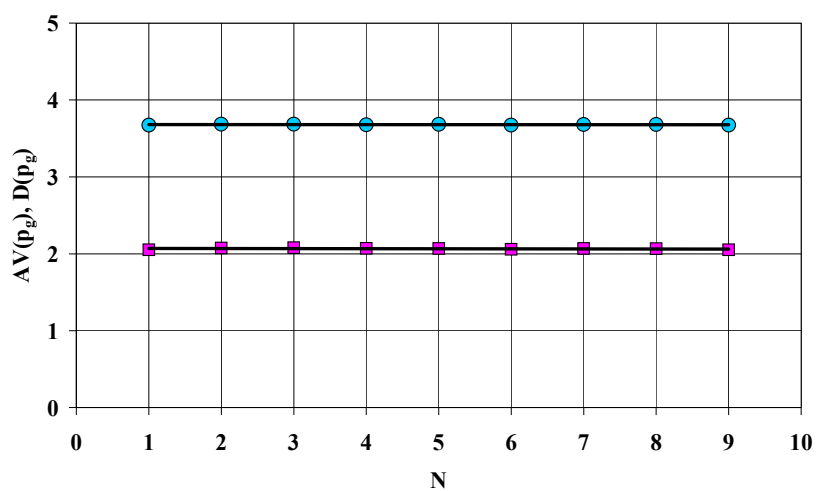


Rys. 4. Zależność korelacyjna procesów ciśnienia wtrysku i ciśnienia indykowanego

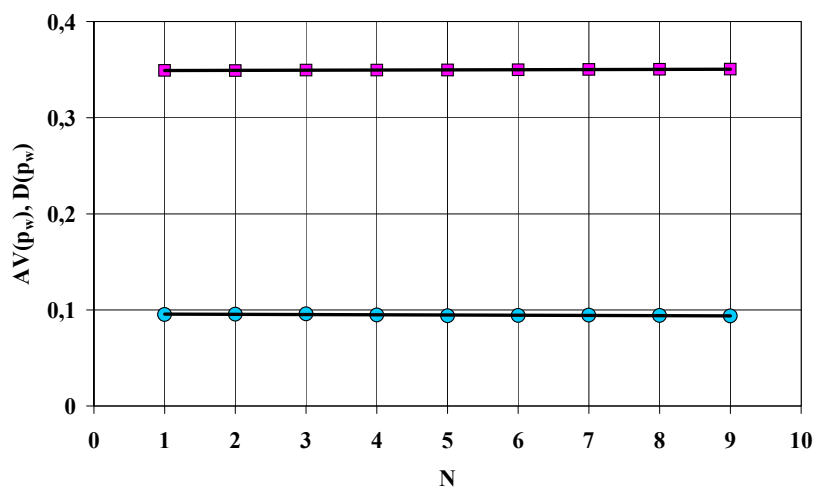


Rys. 5. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona „ ρ ” oraz prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji liniowej „ p ” ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

Badane sygnały zostały poddane analizie stacjonarności [11, 12]. W tym celu wyznaczono w poszczególnych fazach, odpowiadających pseudookresom, wartości średnie oraz odchylenia standardowe (rysunki 6. i 7.).



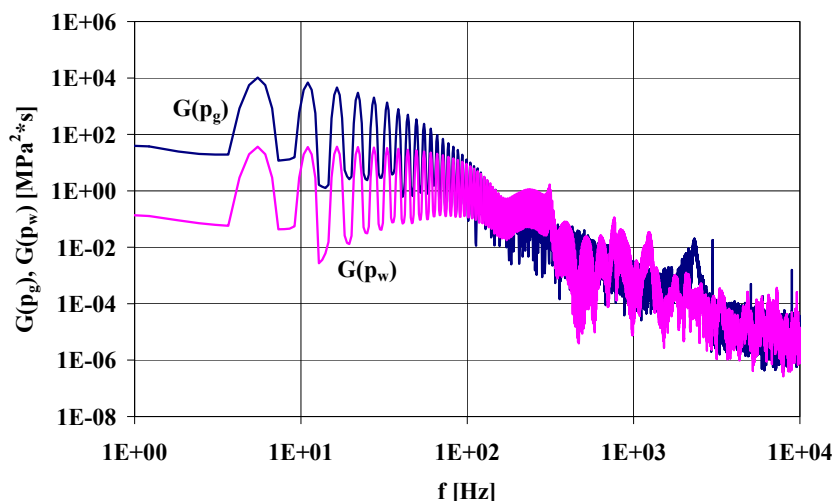
Rys. 6. Wartość średnia i odchylenie standardowe ciśnienia indykowanego w poszczególnych fazach przebiegu



Rys. 7. Wartość średnia i odchylenie standardowe ciśnienia wtrysku w poszczególnych fazach przebiegu

Na podstawie przeprowadzonej analizy przyjęto założenie o stacjonarności badanych sygnałów.

Sygnały ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku poddano analizom czasowej i częstotliwościowej. Do badań wykorzystano algorytm z szybkim przekształceniem Fouriera oraz zastosowano okno Hamminga [11, 12] z szerokością okna 5 próbek. Na rysunku 8. przedstawiono widmową gęstość mocy [11, 12] sygnałów ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku z wyeliminowanymi trendami liniowymi.



Rys. 8. Widmowa gęstość mocy ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

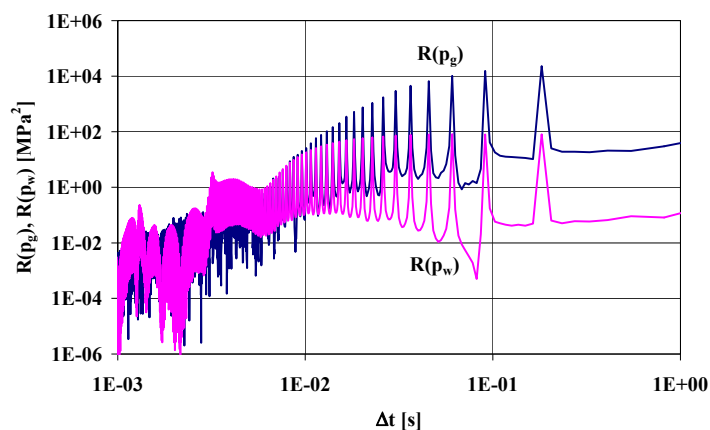
Pierwsze maksimum widmowej gęstości mocy obydwu sygnałów występuje dla częstotliwości $f = 5,4931640625$ Hz, co odpowiada pseudookresowi $T = 1/f = 0,182044$ s. Pseudookres o tej wartości odpowiada prędkości obrotowej

$$n = f \cdot 2 \cdot 60 \quad [\text{min}^{-1}], \quad (4)$$

gdzie f [Hz].

Po podstawieniach $n = 659,2$ min^{-1} średnia prędkość obrotowa, rejestrowana w cyklu badań z częstotliwością 1 Hz, wynosiła $659,3$ min^{-1} [5]. Można na podstawie tych wyników oszacować niedokładność estymacji pseudookresu badanych sygnałów – jest ona mniejsza od 0,023%.

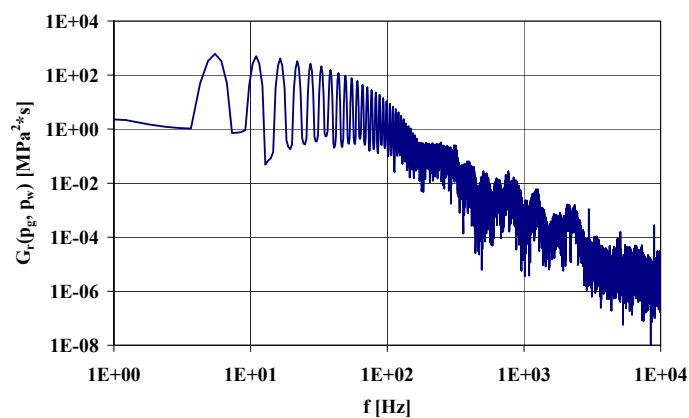
Wyznaczono również funkcję korelacji własnej [11, 12] ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku (rysunek 9.).



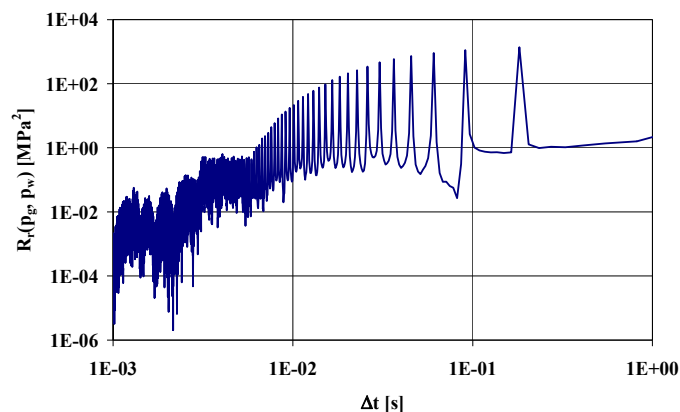
Rys. 9. Funkcja korelacji własnej ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

Wyniki analizy korelacyjnej sygnałów również potwierdzają wyznaczoną wartość pseudookresu – maksimum funkcji korelacji przypada na czas opóźnienia równy $\Delta t = 0,182044$ s.

Przeprowadzono badania wzajemne [11, 12] sygnałów ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku (rysunki 10. i 11.).



Rys. 10. Moduł wzajemnej widmowej gęstości mocy ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

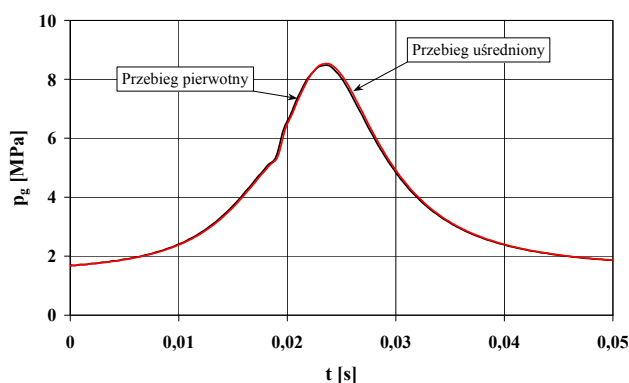


Rys. 11. Funkcja korelacji wzajemnej ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

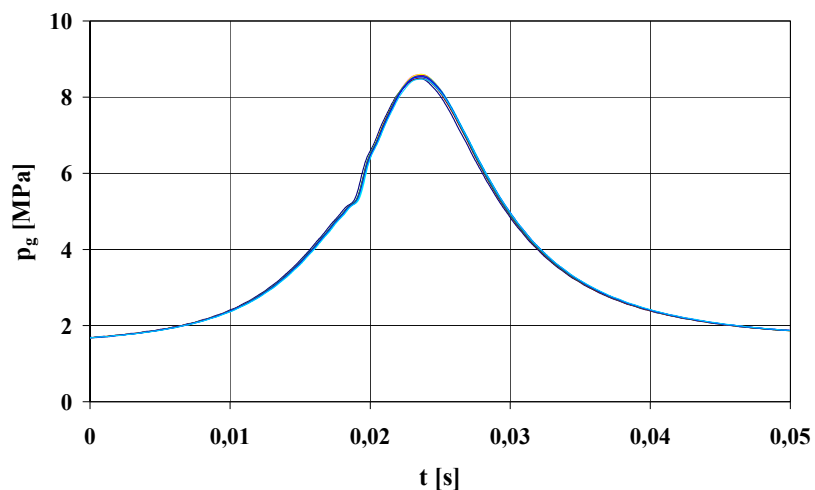
Badania wzajemne sygnałów ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku potwierdzają estymowaną wartość pseudookresu reprezentatywnego dla badanych sygnałów.

Wykorzystując wyznaczoną wartość pseudookresu badanych sygnałów, dokonano ich uśrednienia synchronicznego. Przed uśrednianiem synchronicznym przebiegi poddano filtracji dolnoprzepustowej z częstotliwością graniczną 1 kHz w celu zmniejszenia w badanych sygnałach udziału szumów wysokoczęstotliwościowych. Do realizacji tej operacji wykorzystano filtr z zastosowaniem algorytmu szybkiego przekształcenia Fouriera [2, 3, 11, 12].

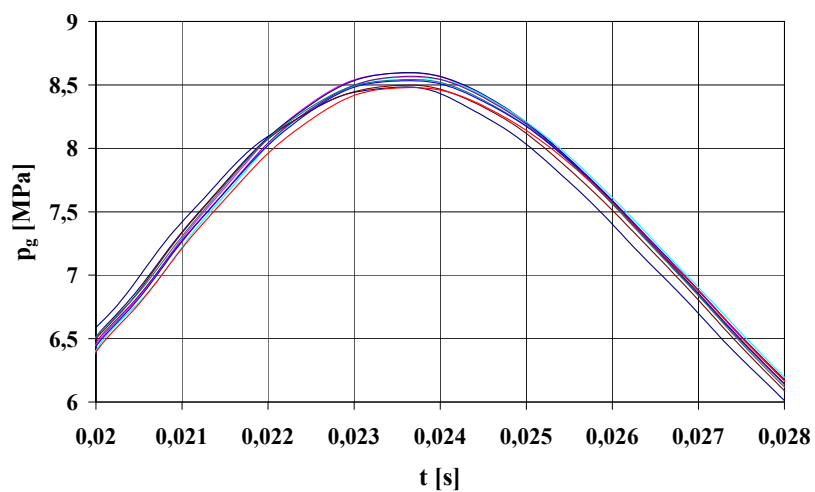
Na rysunku 12. przedstawiono fragment przebiegu pierwotnego i przebiegu uśrednionego ciśnienia indykowanego, a na rysunkach 13. i 14. fragmenty przebiegów poszczególnych faz pierwotnego przebiegu ciśnienia indykowanego.



Rys. 12. Fragment przebiegu pierwotnego i przebiegu uśrednionego ciśnienia indykowanego

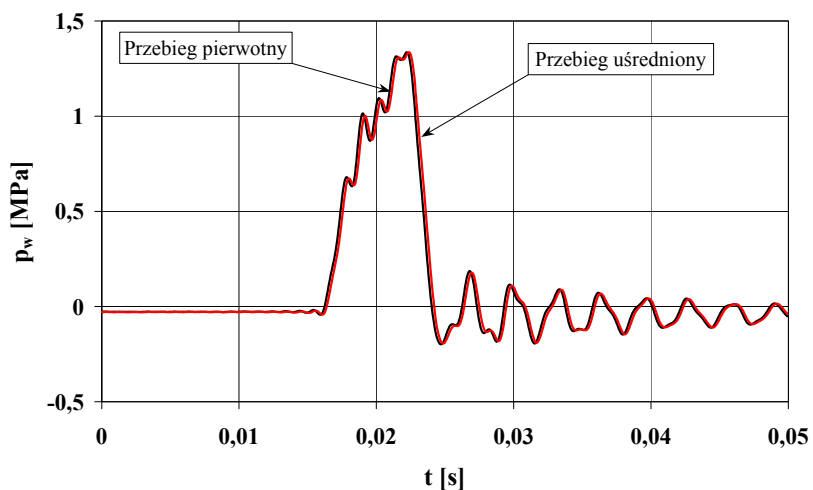


Rys. 13. Fragmenty przebiegów poszczególnych faz pierwotnego przebiegu ciśnienia indykowanego

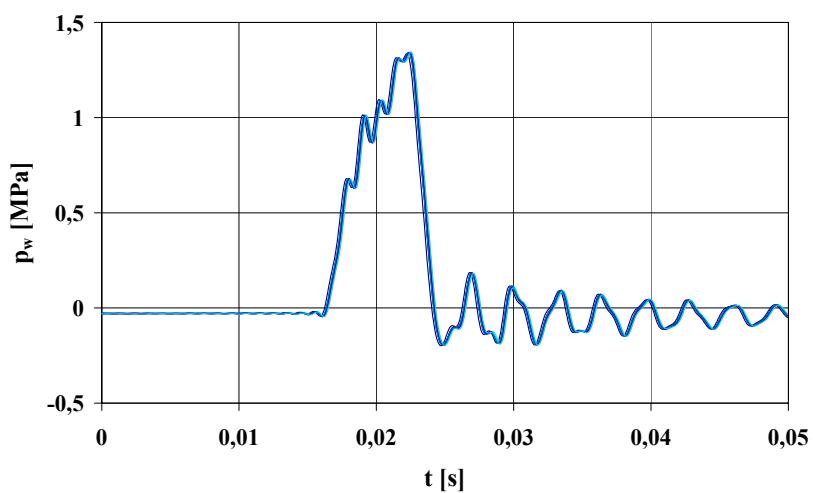


Rys. 14. Fragmenty przebiegów poszczególnych faz pierwotnego przebiegu ciśnienia indykowanego – widok w powiększeniu

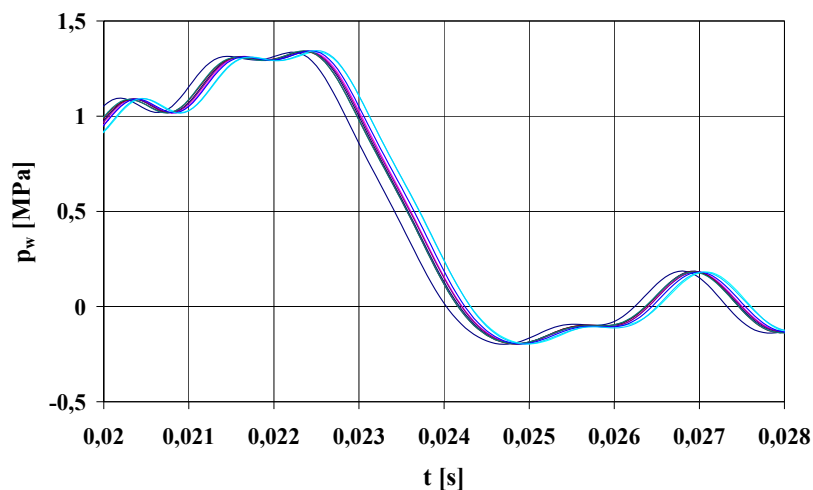
Analogiczne wyniki dla ciśnienia wtrysku przedstawiono na rysunkach 15 – 17.



Rys. 15. Fragment przebiegu pierwotnego i przebiegu uśrednionego ciśnienia wtrysku

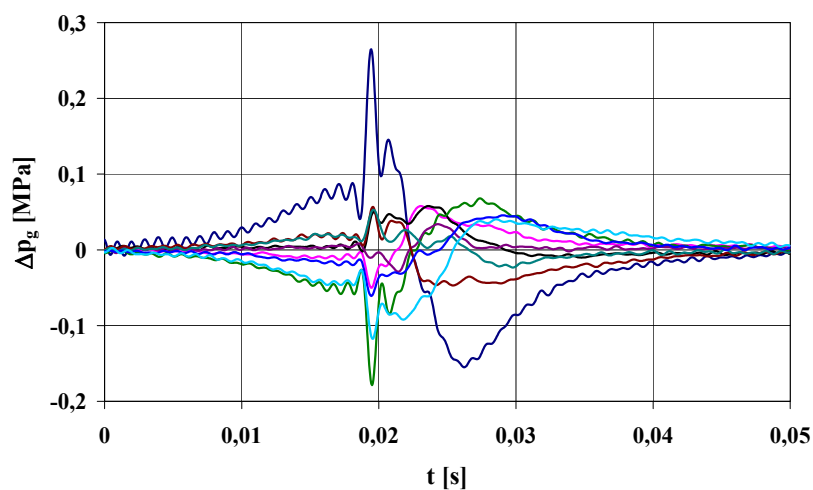


Rys. 16. Fragmenty przebiegów poszczególnych faz pierwotnego przebiegu ciśnienia wtrysku

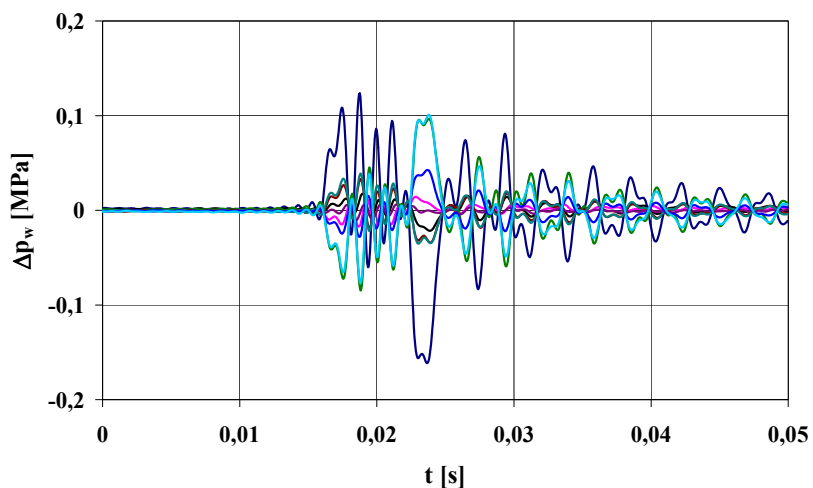


Rys. 17. Fragmenty przebiegów poszczególnych faz pierwotnego przebiegu ciśnienia wtrysku – widok w powiększeniu

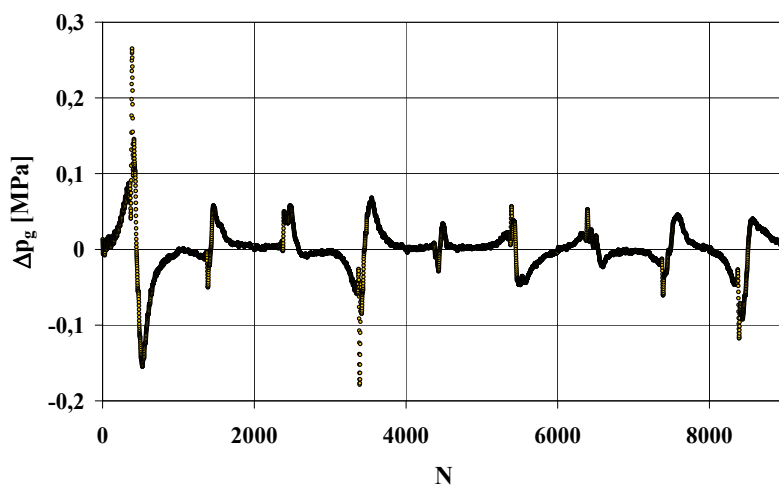
W wypadku obydwu sygnałów przeciętne odchyłki przebiegów pierwotnych wydają się niewielkie. Przebiegi odchyłek w poszczególnych fazach przedstawiono na rysunkach 18. i 19., a zbiory wszystkich odchyłek – na rysunkach 20. i 21.



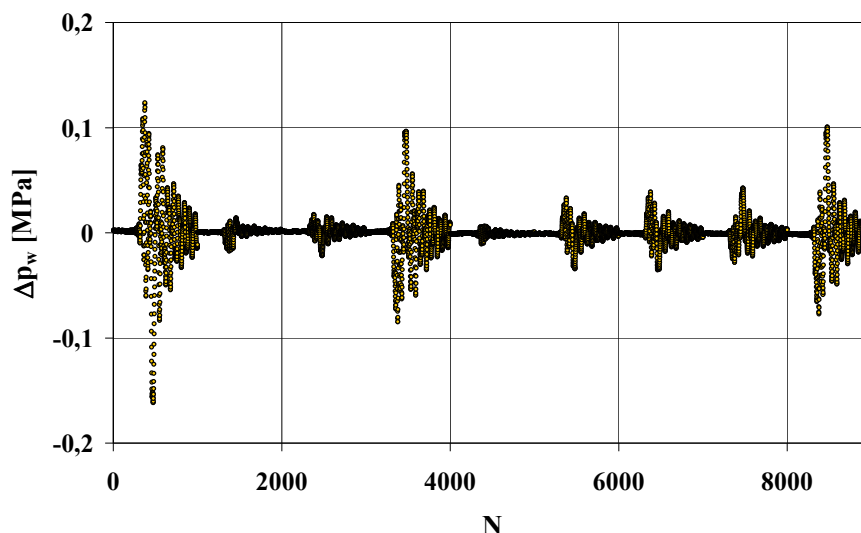
Rys. 18. Przebieg odchyłek od wartości uśrednionej ciśnienia indykowanego w poszczególnych fazach



Rys. 19. Przebieg odchyłek od wartości uśrednionej ciśnienia wtrysku w poszczególnych fazach



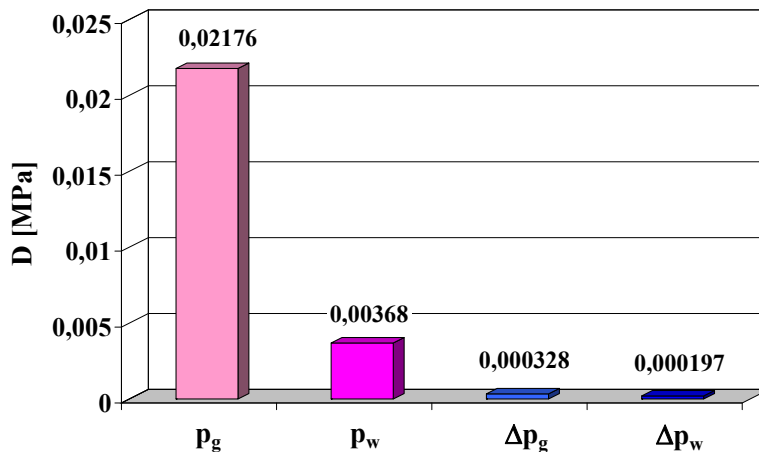
Rys. 20. Zbiór odchyłek od wartości uśrednionej ciśnienia indykowanego w poszczególnych fazach



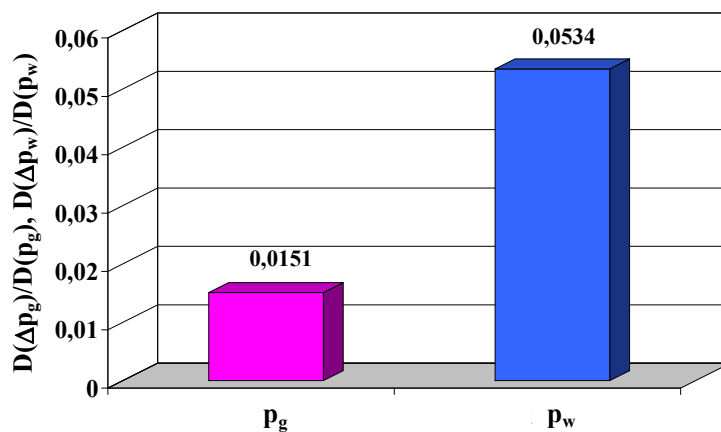
Rys. 21. Zbiór odchylek od wartości uśrednionej ciśnienia wtrysku w poszczególnych fazach

Mimo względnie niewielkich odchylek wartości sygnałów od wartości uśrednionej charakterystyczne jest zjawisko interferencji, szczególnie wyraźne dla ciśnienia wtrysku, którego przebieg charakteryzuje się udziałem składowych o dużych częstotliwościach o większej amplitudzie niż w wypadku ciśnienia indykowanego. Występujące w zbiorach odchylek interferencje są skutkiem: z jednej strony rzeczywistej nieokresowości badanych przebiegów, z drugiej bardzo małej różnicy estymowanego pseudookresu i kolejnych rzeczywistych pseudookresów.

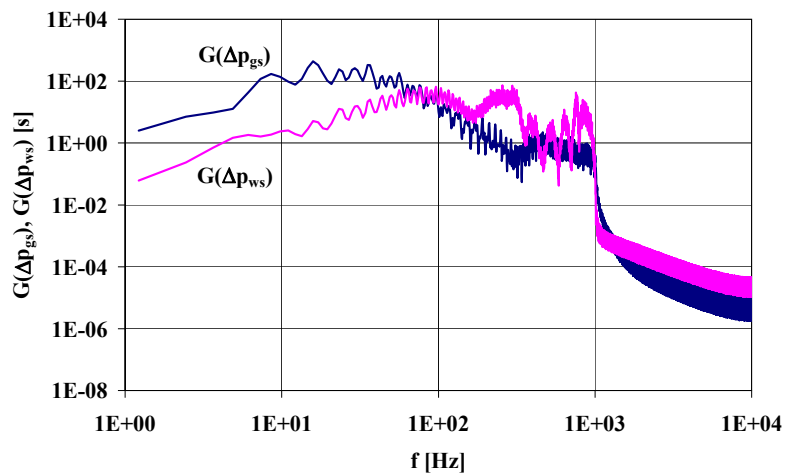
Na rysunkach 22. i 23. przedstawiono wyniki analizy odchylenia standardowego badanych sygnałów i odchylek od ich wartości uśrednionej. Stwierdzono niewielkie wartości odchylenia standardowego odchylek w stosunku do odchylek standardowych sygnałów pierwotnych: mniejszą (około 1,5%) dla ciśnienia indykowanego i większą (około 5%) dla ciśnienia wtrysku – w tym wypadku wyraźnie jest widoczny większy udział niewyeliminowanych z sygnału pierwotnego szumów wysokoczęstotliwościowych (rysunek 24.).



Rys. 22. Odchylenie standardowe zbiorów: ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku oraz odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

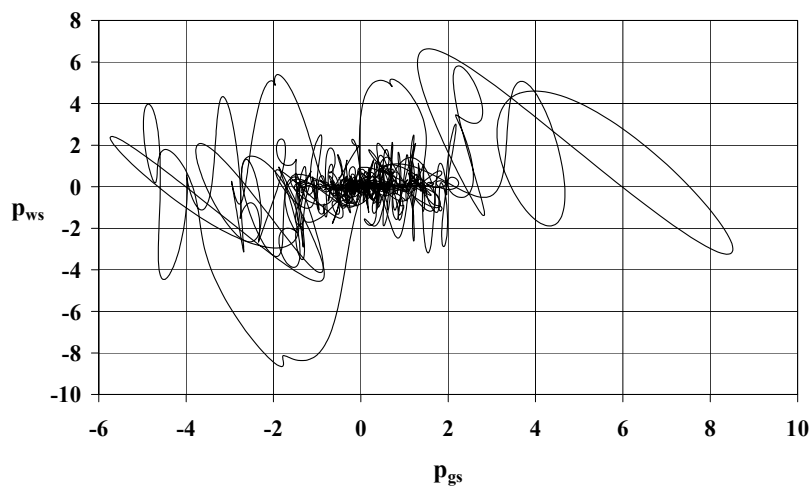


Rys. 23. Stosunek odchylenia standardowego zbiorów: odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku oraz ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

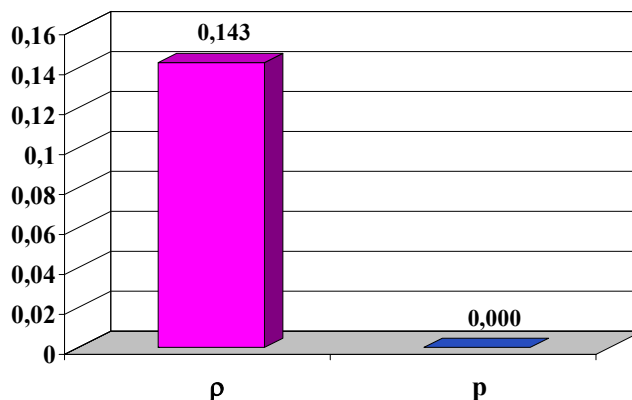


Rys. 24. Widmowa gęstość mocy standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

Na rysunku 25. przedstawiono zależność korelacyjną odchyłek standaryzowanego (o wartości średniej równej zero i odchyleniu standardowym równym 1 [11, 12]) ciśnienia indykowanego i odchyłek standaryzowanego ciśnienia wtrysku, a na rysunku 26. współczynnik korelacji liniowej Pearsona oraz prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji liniowej analizowanych zbiorów [13].



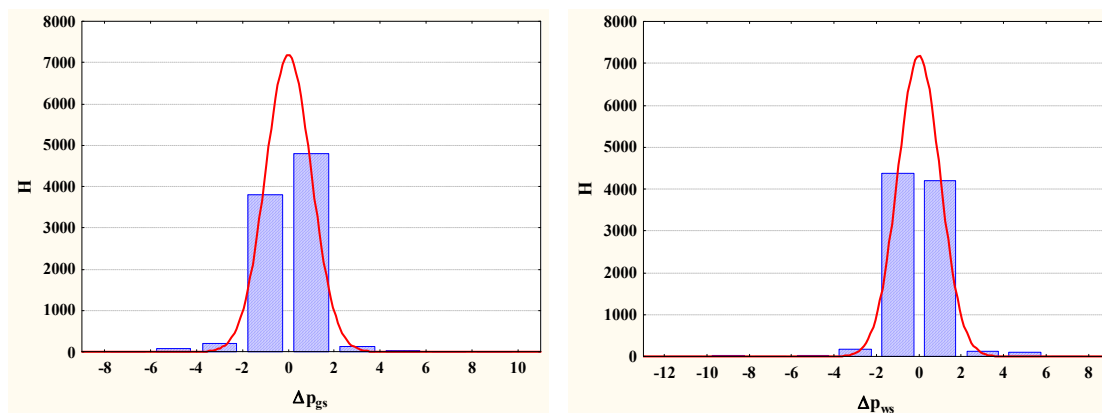
Rys. 25. Korelacyjna zależność standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku



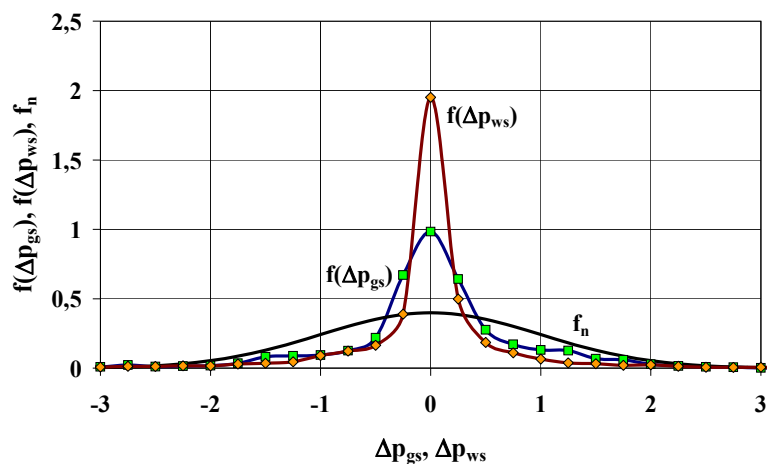
Rys. 26. Współczynnik korelacji liniowej Pearsona „ ρ ” oraz prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy o braku korelacji liniowej „ p ” zbiorów standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

Na podstawie przeprowadzonej analizy stwierdzono, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o braku korelacji liniowej zbiorów standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku.

Zbiory odchyłek ciśnienia indykowanego i odchyłek standaryzowanego ciśnienia wtrysku oraz odchyłek standaryzowanych poddano analizie w dziedzinie wartości. Na rysunku 27. przedstawiono histogramy standaryzowanych zbiorów odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku, a na rysunku 28. gęstość prawdopodobieństwa badanych zbiorów.

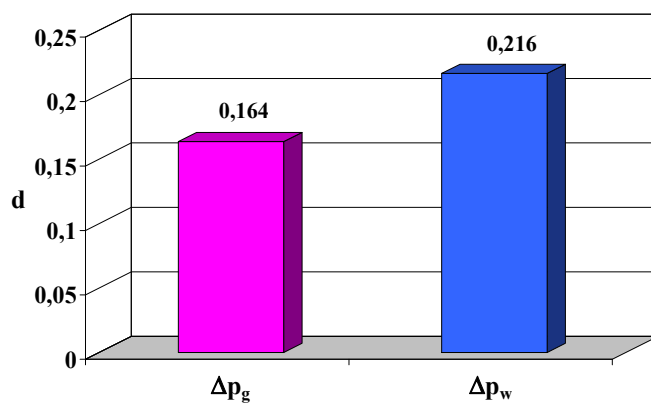


Rys. 27. Histogram zbiorów standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego „ Δp_{gs} ” i ciśnienia wtrysku „ Δp_{ws} ” (linią zaznaczono rozkład normalny)

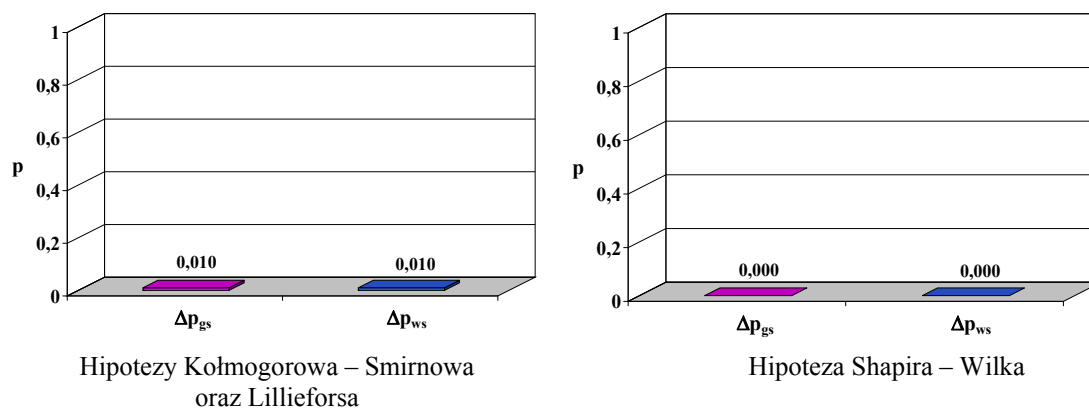


Rys. 28. Gęstość prawdopodobieństwa zbiorów standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku

Dokonano również oceny zgodności badanych zbiorów z rozkładem normalnym. Do testowania hipotez o zgodności badanych zbiorów z rozkładem normalnym wykorzystano hipotezy: Kołmogorowa – Smirnowa [1, 9, 15], Lillieforsa [1, 10] i Shapira – Wilka [1, 14]. Na rysunku 29. przedstawiono statystykę Kołmogorowa – Smirnowa zbiorów standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku, na rysunku 30. prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotez Kołmogorowa – Smirnowa, Lillieforsa oraz Shapira – Wilka.



Rys. 29. Statystyka Kołmogorowa – Smirnowa zbiorów standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku



Rys. 30. Prawdopodobieństwo nieodrzućcia hipotez Kołmogorowa – Smirnowa, Lillieforsa oraz Shapira – Wilka o zgodności zbiorów standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku z rozkładem normalnym

W wyniku badań analizowanych zbiorów stwierdzono, że nie ma podstaw do przyjęcia hipotez (Kołmogorowa – Smirnowa, Lillieforsa oraz Shapira – Wilka) o zgodności zbiorów standaryzowanych odchyłek od wartości uśrednionych ciśnienia indykowanego i ciśnienia wtrysku z rozkładem normalnym. Prawdopodobnie dla charakteru różnego od rozkładu normalnego analizowanych odchyłek decydujące znaczenie ma duży udział interferencji w analizowanych zbiorach. W wypadku ściśle synchronicznego uśredniania badanych sygnałów należałoby raczej oczekiwać odchyłek od wartości uśrednianej o rozkładzie normalnym.

PODSUMOWANIE

Badania procesów szybkozmiennych sprawiają znaczne trudności, które mogą skutkować nadinterpretacją wyników, mianowicie formułowaniem sądów na temat badanych zjawisk na podstawie badania właściwości układów pomiarów oraz na podstawie wiedzy zdobytej w wyniku analizy zjawisk, nieuwzględnianych w jawny sposób w programie badawczym. Konieczna jest w związku z tym sformalizowana krytyczna analiza wyników pomiarów, oparta na merytorycznej znajomości badanych zjawisk oraz na formalnym aparacie przetwarzania wyników pomiarów.

Przykładowe analizy przeprowadzone w niniejszej pracy potwierdziły celowość wszechstronnego badania zarejestrowanych sygnałów oraz badania właściwości szumów. Badania takie mogą m.in. uzasadnić tezę o fizycznej naturze szumów eliminowanych z sygnału pierwotnego, w wyniku analizy może powstać stwierdzenie, że dominującym udziałem w naturze szumów są przekształcenia dokonywane na zarejestrowanym sygnale. Taki przypadek odnotowano w niniejszej pracy – pewne właściwości badanych szumów miały swe źródło w ich wyodrębnianiu z sygnału pierwotnego: interferencje powstałe w wyniku uśredniania synchronicznego.

Wszechstronne badanie zarejestrowanych sygnałów jest konieczne w celu uniknięcia trudnych do przewidzenia błędów merytorycznych w dalszych analizach. Przykłady takich błędów na skutek przetwarzania sygnałów obciążonych szumami o nieznaney naturze są w dziedzinie silników liczne, jak choćby wyznaczanie natężenia wywiązywania ciepła w cylindrze na podstawie sygnału ciśnienia indykowanego, w którym to wypadku badaniom są poddawane zazwyczaj szumy numerycznego różniczkowania ciśnienia indykowanego [3, 4].

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

AV	– wartość średnia
d	– statystyka Kołmogorowa – Smirnowa
D	– odchylenie standardowe
f	– częstotliwość
g	– gęstość prawdopodobieństwa
G	– widmowa gęstość mocy
G_r	– wzajemna widmowa gęstość mocy
H	– częstość wartości procesu na histogramie
n	– prędkość obrotowa
p	– prawdopodobieństwo nieodrzućenia hipotezy
p_g	– ciśnienie indykowane
p_w	– ciśnienie wtrysku
R	– funkcja korelacji własnej
R_r	– funkcja korelacji wzajemnej
T	– pseudokres sygnału
t	– czas
x	– proces
\bar{x}	– proces uśredniony synchronicznie

- t – opóźnienie czasu
- p_g – odchyłka ciśnienia indykowanego
- p_w – odchyłka ciśnienia wtrysku
- p_{gs} – standaryzowana odchyłka ciśnienia indykowanego
- p_{ws} – standaryzowana odchyłka ciśnienia wtrysku
- r – współczynnik korelacji liniowej Pearsona

Słowa kluczowe:

silnik spalinowy, procesy szybkozmiennne, procesy stochastyczne, szумы wysoko-częstotliwościowe

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., *On selected methods of numerical differentiation on the example of cylindrical pressure course differentiation*, „Journal of KONES”, Gdańsk 2001.
- [4] Chłopek Z., *The subject of task explicitness in numerical differentiation*, „Journal of KONES”, Gdańsk 2001.
- [5] Chłopek Z., Piaseczny L., *Badania statystycznych właściwości silnika spalinowego w statycznych warunkach pracy*, „Zeszyty Naukowe” Akademii Marynarki Wojennej, 2004, nr 1, Gdynia.
- [6] Chłopek Z., Piaseczny L., *O roli modelowania w badaniach naukowych*, „Zeszyty Naukowe” Akademii Marynarki Wojennej, 2001, nr 2, Gdynia.
- [7] Chłopek Z., Piaseczny L., *Remarks about the modelling in science researches*, „Eksplatacja i Niezawodność”, 2001, nr 4.
- [8] Fisz M., *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna*, PWN, Warszawa 1967.
- [9] Kolmogorov A., *Confidence limits for an unknown distribution function*, „Annals of Mathematical Statistics”, 12 (1941).

- [10] Lilliefors H. W., *On the Kolmogorov – Smirnov test for normality with mean and variance unknown*, „Journal of the American Statistical Association”, 64 (1967).
- [11] Oppenheim A. V., Schafer R. W., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów*, WKŁ, Warszawa 1979.
- [12] Otnes R. K., Enochson L., *Analiza numeryczna szeregów czasowych*, WNT, Warszawa 1978.
- [13] Pearson K., *On the theory of contingency and its relation to association and normal correlation*, Drapers' Company Research Memoirs, Biometric Ser. I, 1904.
- [14] 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).
- [15] Smirnov N. V., *Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions*, „Annals of Mathematical Statistics”, 19 (1948).

ABSTRACT

Investigations of fast-changing process in relation to the processes characterized by dynamic properties, characteristic of typical equipment exploitation conditions, cause a lot of methodological problems. The internal combustion engine is a typical object whose description is accompanied by such problems. The paper presents the basic difficulties related to investigations of fast-changing processes occurring in an internal combustion engine. The indicated pressure process was used as an example. The paper analyses the dynamic properties of the processes investigated and considers the problems of synchronic averaging of pseudo-periodical signals in order to reduce the part of high-frequency noises in the useful signal. Limitations in effectiveness of reduction in eliminating high-frequency noise of the signals investigated were found out.

Recenzent prof. dr hab. inż. Marek Orkisz