

MERKISZ¹ Jerzy
WALIGÓRSKI¹ Marek

MOŻLIWOŚCI OCENY ESTYMAT PROCESU CHAOTYCZNEGO NA PRZYKŁADZIE PROCESU SPALANIA W SILNIKU O ZAPŁONIE SAMOCZYNNYM

W artykule zaprezentowano zagadnienie oceny diagnostycznej procesu spalania w silniku ZS z wykorzystaniem procesów towarzyszących. Niniejsza praca dotyczy procesów wibroakustycznych, spośród których Autorzy wybrali do oceny procesy drganiowe. Z uwagi na właściwości jakie posiadają rozważane procesy i możliwości ich wykorzystania w diagnozowaniu procesów wolno- jak i szybkozmiennych zachodzących w silnikach spalinowych, zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i eksploatacji silnika w pojeździe, niezbędne stało się uwzględnienie tych procesów w okresowej i ciągłej analizie stanu technicznego silnika i poprawności realizacji procesów w nim zachodzących. Do badań wybrano silnik o zapłonie samoczynnym stosowany w pojazdach o zastoso- waniach pozadrogowych o dopuszczalnej masie całkowitej powyżej 3500 kg. Rozważania nad możliwością aplikacji metody przeprowadzono w aspekcie analizy diagnostycznej i jej zastosowania w systemie oceny diagnostycznej procesu spalania, a w szerszym ujęciu również w aspekcie ograniczenia źródeł nadmiernej emisji wynikającej z nieprawidłowości w procesie bądź degradacji charakterystyk funkcjonalnych obiektu technicznego, bądź potencjalnych uszkodzeń występujących w jego elementach i podzespołach podczas eksploatacji. Zastosowano nieliniową metodę analizy przyspieszeń drgań generowanych w silniku opartą o wykorzystanie teorii chaosu deterministycznego, przy pomocy której poszukiwano składowych nieliniowych uzyskanych z przebiegów czasowych procesu. Miarą ilościowej oceny były estymatory procesu, których zmiany były przedmiotem analiz autorskich. Uwzględniono również ograniczenia metody i wytyczne kwalifikacji procesu jako nieprawidłowy.

POSSIBILITIES OF THE CHAOTIC PROCESS ESTIMATORS ASSESSMENT ON THE EXAMPLE OF THE COMBUSTION PROCESS IN A COMPRESSION- IGNITION ENGINE

The paper describes the issue of the diagnostic assessment of the combustion process taking place in CI engine with the help of accompanying processes. The above work concerns vibroacoustic processes, among which authors chosen vibration ones to the research. In view of the characteristics that the above processes have and the possibilities of their application in the diagnosis of the slow and fast processes taking place in combustion engines, both for laboratory and vehicle exploitation conditions, the necessity of taking into account of these processes for periodic and on-line analyses of the engine

¹Politechnika Poznańska, Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Polska; Poznań 60-965; ul. Piotrowo 3.
Tel.: + 48 61 665-22-07, fax: +48 61 665-22-04; e-mail: office_ice@put.poznan.pl

technical state and correctness of the engine processes occurred a requirement. The research was performed for CI engine used in off-road vehicles with the maximum gross weight above 3500 kg. Evaluations of the possibility of the method application were performed in the point of view of the diagnostic analysis and its use in the diagnostic system for combustion process and in the broader view also in the aspect of the limitation of excessive emission sources (occurred by incorrect processes runs or by functional characteristics decrease of the technical object or by potential failures of the engine elements and subassemblies during exploitation). Non-linear method of the analysis of vibration acceleration generated in an engine, basing on deterministic chaos theory use, with the help of which non-linear components obtained from the time-domain processes runs were searched. Process estimators were the measures of the quantity assessment, changes of which were the subject of the author analyses. Method limits and qualification guidelines of an incorrect process are described as well.

1. WSTĘP

Silnik spalinowy, jako mechaniczny obiekt techniczny, przeznaczony jest do wykonywania ściśle określonych zadań w danych warunkach eksploatacyjnych. Ważne jest, aby posiadał on określony zasób cech użytkowych, dzięki którym możliwe będzie realizacja funkcji, jakie mu przypisano już w procesie jego projektowania i przeznaczenia do danego odbiornika mocy. W wyniku procesu eksploatacji silnika następują zmiany jego charakterystyk funkcjonalnych, w tym również niezawodności i trwałości. Intensywność tychże procesów, uzależniona od warunków użytkowania silnika, decyduje o możliwościach realizacji zadanych funkcji roboczych i towarzyszących. Sukcesywne zmiany funkcjonalne w obiekcie zwiększają entropię tego układu. Istotnego znaczenia nabiera kontrola takiego procesu i analiza ilościowa rozważanych zmian estymat. Ważnym zagadnieniem z punktu widzenia diagnostyki obiektu jest również analiza uszkodzeń i nieprawidłowości jakie mogą wystąpić podczas eksploatacji silnika, gdy jest on zdalny technicznie, a wynikające uszkodzenie ma charakter losowy.

Strukturę silnika spalinowego tworzą jego elementy konstrukcyjne, będące w określonym położeniu geometrycznym i wzajemnie powiązane funkcjonalnie między sobą. Zespoły silnika stanowią elementy o własnej strukturze, które są utworzone przez układy i mechanizmy. Rozważana struktura decyduje o całości właściwości technicznych oraz eksploatacyjnych silnika, tych które zostały uwzględnione w procesie projektowania konstrukcji. Zbiór mierzalnych wielkości umożliwia ocenę zmian zachodzących w tejże strukturze. Dzięki tym wielkościom, uzyskanym w procesie bieżącej ich rejestracji oraz porównaniu ich z wartościami progowymi, jest możliwa ocena stanu technicznego silnika. Parametry struktury oddziałują na parametry wyjściowe, dzięki czemu wskazują na charakter współpracy zachodzącej między elementami systemu. Jednak by mogły one stanowić bazę do oceny diagnostycznej procesu lub stanu technicznego obiektu, każdej wartości parametru struktury musi odpowiadać jedna wartość parametru wyjściowego. Ważne jest również, aby małej zmianie parametru struktury odpowiadała możliwie duża zmiana parametru wyjściowego, który jednocześnie byłby relatywnie łatwy do uzyskania w procesie pomiarowym. W celu wyznaczenia możliwie jak najbardziej dokładnego opisu stanu technicznego silnika i procesów w nim zachodzących, niezbędne jest ustalenie odpowiednio licznego zbioru parametrów wyjściowych. Stąd tak ważne jest, aby przy ocenie diagnostycznej obiektu nie ograniczać się wyłącznie do oceny parametrów procesów

roboczych, lecz uwzględniać również te procesy, które są ich następstwem. W każdym jednak przypadku jako warunek przyjęcia danej wielkości fizycznej za parametr diagnostyczny jest to, aby możliwa była interpretacja fizyczna zależności między zmianą stanu systemu a wartości tejże wielkości fizycznej.

Sygnaly uzyskane w pomiarach składają się z jednowymiarowych przebiegów czasowych. Jak dotąd, w celu poprawy procesu monitorowania, diagnozowania i sterowania urządzeń technicznych stosowano zazwyczaj metody liniowe. Wprowadzano wybrane elementy nieliniowości w klasycznym podejściu liniowym, lecz nie stosowano ich bezpośrednio [2]. Wiele procesów w obszarze techniki zawiera w swojej dynamice elementy nieliniowe [2, 3, 4, 5, 9, 10]. Może to być wykorzystane do poprawy procesu kontroli, diagnostyki i sterowania urządzeń technicznych. Teoria chaosu deterministycznego stanowi relatywnie dobre narzędzie do takiej analizy z uwagi na to, iż bezpośrednio wykorzystuje modele nieliniowe. Niniejsza teoria jest rozwinięciem klasycznej teorii liniowych modeli dynamicznych [11]. Dzięki niej możliwy jest opis procesu jako „nieprzewidywalne długookresowe zachowanie deterministycznego systemu dynamicznego, spowodowanego wrażliwością na warunki początkowe”. Nieliniowy system chaotyczny stanowi w pełni zdeterminowany system i jest w pełni przewidywalny, jeżeli występuje pełna wiedza o warunkach początkowych. W literaturze można odnaleźć określenie „inżynieria chaosu” do opisu zastosowania teorii chaosu deterministycznego w obszarze inżynierii i przemysłu [3]. Powyższe podejście umożliwia lepsze zrozumienie procesów dynamicznych zachodzących w silniku [7, 8, 9, 12]. Każdy bowiem stan rzeczywisty układu jest zawsze określony z zadaną dokładnością. Celowym jest więc opis takiego układu za pomocą rozkładu prawdopodobieństwa. Oznacza to, iż w układzie zdeterminowanym można oczekiwać również dynamiki typowej dla układów stochastycznych, którego ruch nazywany jest deterministycznym chaosem. Ruchy chaotyczne stanowią obecną nieodłączną część dynamiki nieliniowej. Mogą występować nie tylko jako efekt symulacji numerycznej równań różniczkowych nieliniowych dla pewnych szczególnych parametrów, lecz również w realnych obiektach technicznych, w tym mechanicznych [1, 2, 5, 6].

Chaos dla ciągłych równań różniczkowych definiującą ewolucję w przestrzeni stanu powstaje wówczas, gdy powyższa przestrzeń jest minimum trójwymiarowa. W przypadku układów dyskretnych, chaos może pojawić się już dla jednego wymiaru. Oznacza to, iż obserwowane zjawiska chaotyczne leżą pomiędzy przewidywalnymi, regularnymi lub quasi-okresowymi sygnałami a całkowicie nieregularnymi sygnałami stochastycznymi. Jednak w przeciwieństwie do sygnałów stochastycznych, chaos w przestrzeni fazowej objawia struktury geometryczne.

Do oceny zbieżności lub rozbieżności trajektorii potoku fazowego stosuje się wykładniki Lapunowa [2], które są ważnym narzędziem do wykrywania chaosu. Dodatnie wartości wykładników wskazują na rozbieżność orbit i występowanie chaosu w systemie. Dla układów o wymiarze powyżej 1 występuje zbiór wykładników Lapunowa, z których każdy charakteryzuje orbitalną rozbieżność w danym kierunku. Ilość wykładników Lapunowa jest zgodna z wymiarem przestrzeni fazowej. Dodatni wykładnik Lapunowa w przestrzeni trójwymiarowej świadczy o chaosie, zerowy oznacza wolniejszy od wykładniczego ruch wzdłuż trajektorii a ujemny wykładnik oznacza istnienie w przestrzeni fazowej regularnego atraktora [2]. Jeśli system jest globalnie liniowy i stabilny, wszystkie wykładniki Lapunowa są zerowe lub ujemne i nie ma żadnego wytwarzania informacji. Jeśli dowolny jeden wykładnik Lapunowa jest większy od zera system staje się niestabilny .

Dodatnie wartości λ powodują rozciągnięcie orbity przestrzeni fazowej przez ukryte niestabilności. Rozproszenie, które ogranicza amplitudę ruchów zgodnie z ograniczoną energią, przywraca rozciągnięte lub niestabilne orbity z powrotem do zwartej przestrzeni stanu. Powyższe zjawiska są zasadniczym sprzężeniem procesów, oddziałujących na powstanie w przestrzeni stanu zbiorów fraktalnych, na których odbywa się ruch, podkreślając przez to nieperiodyczną naturę chaotycznej ewolucji systemu dynamicznego.

Powyższa praca stanowi odpowiedź na pytanie o możliwość zastosowania metod nieliniowych, w tym również teorii chaosu deterministycznego do oceny procesu spalania w silniku spalinowym o zapłonie samoczynnym. Rozważana ocena dotyczy analizy zmian zachodzących w procesie, reprezentujących nieprawidłowości zachodzące w obiekcie, wynikające z realizacji procesów roboczych. Pracę nad analizą prawidłowości przebiegu procesu spalania w silniku tłokowym oparto na wykorzystaniu sygnału uzyskanego w wyniku realizacji procesów towarzyszących.

2. OBIEKT BADAWCZY I WARUNKI BADAŃ

Praca dotyczy etapu badań, który przeprowadzono na silniku 16H12A (silnik spalinowy lokomotywy 401Da) w warunkach odzwierciedlających warunki eksploatacji powyższego pojazdu o zastosowaniach pozadrogowych – tablica 1 i 2.

Tab. 1. Dane techniczne lokomotywy spalinowej typu 401Da

Dane lokomotywy	Parametry techniczne
Oznaczenie	401Da
Moc na cele trakcyjne [kW]	242
Prędkość maksymalna [km/h]	60
Prędkość ciągła [km/h]	11,3
Siła pociągowa przy prędkości ciągłej [kN]	53,96
Siła pociągowa rozruchowa (teoretyczna) [kN]	112,8
Szerokość toru [m]	1,435
Maksymalny nacisk zestawu na tor [kg]	133000
Najmniejszy promień łuku toru [m]	80
Rozstaw osi skrajnych [m]	4,4
Długość lokomotywy ze zderzakami [m]	10,14
Ciężar lokomotywy z zapasami [kg]	40 000
Zapas paliwa [dm ³]	196
Rodzaj hamulca	pneumatyczny typu Oerlikon

Tab. 2. Dane techniczne silnika spalinowego typu 16H12A

Cecha/parametr	Wartość
Rodzaj silnika	ZS, 4-suwowy
Średnica cylindra \times skok tłoka: $D \times S$ [m]	$0,135 \times 0,155$
Stopień sprężania (ϵ)	14,0
Objętość skokowa silnika (V_{ss}) [m ³]	$26,6 \cdot 10^{-3}$
Liczba zaworów	4
Ciśnienie otwarcia wtryskiwacza (p_{wtr}) [MPa]	$19 \pm 0,5$
Układ cylindrów/liczba cylindrów	V/12
Kąt rozwidlenia cylindrów silnika [°]	60
Średnie ciśnienie użyteczne [MPa]	0,77
Znamionowa moc użyteczna (N_e) [kW]	257 (1500 obr/min)
Średnia prędkość tłoka [m/s]	7,75
Jednostkowe zużycie paliwa g_e [g/kW·h]	224
Ciśnienie wtrysku [MPa]	75,5
Ciężar silnika suchego [kg]	2120

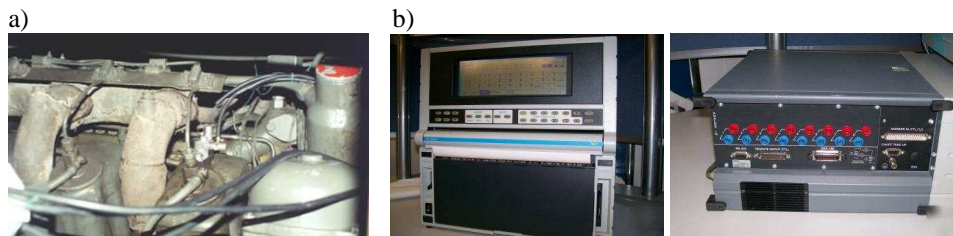
Sygnały pomiarowe uzyskane z przetworników (rys. 1) były kierowane do wzmacniaczy, w których poddawane były procesowi wzmocnienia i normalizacji. Następnie kierowano je na analogowe wejścia karty pomiarowej. Wewnątrz niej poddawano je procesowi filtracji z zastosowaniem filtrów analogowych i cyfrowych, po czym przetwarzano je z postaci analogowej w cyfrową. Sygnały uzyskane w karcie pomiarowej, w postaci cyfrowej, były następnie zapisywane w pamięci komputera. Zarejestrowane wszystkie przebiegi czasowe sygnałów pomiarowych poddano procesowi selekcji czasowej. W ramach powyższego procesu sygnały podzielono na przedziały zawierające cykle pracy silnika.

Brak zapłonu w badaniach silnika 16H12A był symulowany przez odłączenie dostarczania paliwa do wybranego cylindra silnika. Przetwornik przyspieszeń drgań zamocowano do silnika w miejscu, gdzie można było określić kierunek przyspieszeń. Zastosowano 16-kanałowy rejestrator TA11 Gould wykorzystujący przetworniki Brüel & Kjær 4395. Analizę sygnałów realizowano z zastosowaniem programu NDT.

Pomiary na silniku 16H12A lokomotywy przeprowadzono w następujących warunkach:

- trzy prędkości obrotowe: $n_1 = 650\text{--}680$ obr/min (bieg jałowy), $n_2 = 1100$ obr/min, $n_3 = 1500$ obr/min,
- trzy etapy pomiarowe: etap 1 – przetwornik zamocowany na cylindrze 1 – wszystkie cylindry pracują prawidłowo, etap 2 – przetwornik zamocowany na cylindrze 1 – cylinder 1 rozłączony, etap 3 – przetwornik zamocowany na cylindrze 1 – cylinder 4 rozłączony.

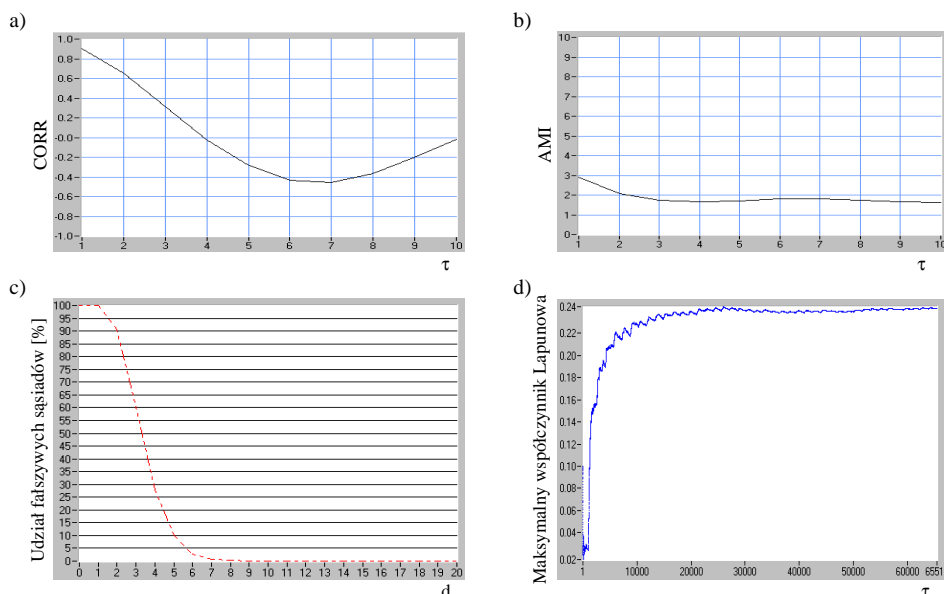
Przetwornik zamocowano na cylindrze 1. Sygnały rejestrowano w trzech kierunkach: wzdłuż osi cylindra, prostopadle do niej w kierunku osi wału oraz prostopadle do obu kierunków (drugi i trzeci kierunek dobrano celem porównania z kierunkiem Z). Przetworniki drgań zamocowano na głowicy silnika.



Rys. 1. Widok umiejscowienia przetworników pomiarowych na silniku 16H12A (a) oraz rejestratora TA11 Gould (b)

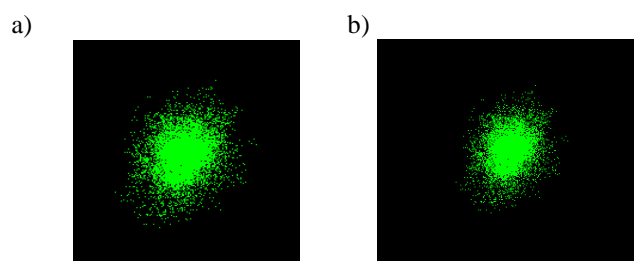
3. NIELINIOWA ANALIZA ESTYMAT PROCESU CHAOTYCZNEGO DLA SPALANIA W SILNIKU ZS

Opóźnienie czasowe τ obliczono jako pierwsze miejsce zerowe funkcji autokorelacji (COR – *autocorrelation function*) oraz pierwszego minimum uśrednionej informacji wzajemnej (AMI – *averaged mutual information*). Ostateczną wartość τ zazwyczaj wybiera się z AMI ze względu na to, iż reprezentuje ona rzeczywiste właściwości nieliniowe (rys. 2). Ostatecznie, decyzja o tym jaka wartość ma być wybrana była podjęta na podstawie konieczności zastosowania tych samych (lub zbliżonych) wartości parametrów dla porównanych sygnałów. Z kolei wymiar d uzyskano z zastosowaniem powyższej metody.



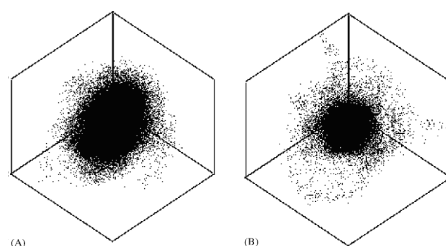
Rys. 2. Przebieg funkcji autokorelacji (a), uśrednionej informacji wzajemnej (b), względnego udziału fałszywych sąsiadów od wymiaru d (c) i maksymalnego współczynnika Lapunowa dla silnika 16H12A ($n = 1500$ obr/min, kierunek Z, proces spalania we wszystkich cylindrach)

Podczas analizy i poszukiwania wymiaru „zanurzenia” d brano pod uwagę zależność względnego procentowego udziału fałszywych sąsiadów od wymiaru d i rozważono na początek dwa przypadki: gdy przebieg wykresu podąża do uzyskania wartości 5% i gdy przebieg wykresu podąża do wartości 0%. W drugim przypadku (0%) odnotowano trudności w oszacowaniu wartości. Obniżanie się przebiegu wykresu do wartości 0% nie było dokładne i dobrze rozpoznawalne, a obliczenia zazwyczaj czasochłonne. Poziom wynoszący 5% był wystarczający, ponieważ zazwyczaj wskazywał na obszar, gdzie wykres osiągał *plateau*. Dodatkowo, wykresy fazowe dla progu 0% i 5% fałszywych sąsiadów wykazywały podobieństwo w odzwierciedleniu procesu, stąd możliwym było wybranie 5% wartości progu udziału fałszywych sąsiadów w ocenie wymiaru d (rys. 3).

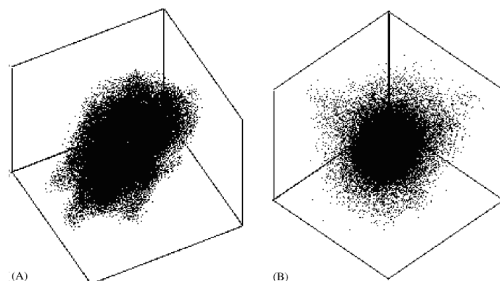


Rys. 3. Obraz fazowy w trójwymiarowej przestrzeni fazowej jako rzut obrazu z przestrzeni wielowymiarowej dla $n = 650$ obr/min: a) dla $\tau = 3$ i $d_{5\%} = 5$, b) dla $\tau = 3$ i $d_{0\%} = 9$

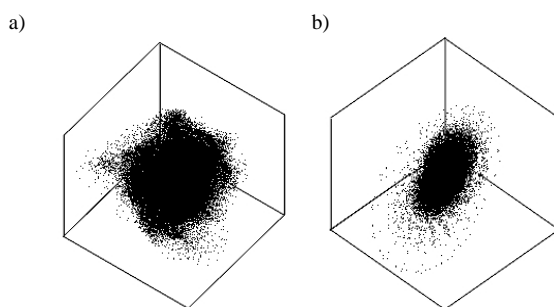
Dla uzyskanych sygnałów wartość opóźnienia czasowego mieściła się w zakresie $\tau = 12-14$ ($\tau_{sr} = 12,78$) a wymiar „zanurzenia” $d = 5-6$ ($d_{sr} = 5,5$). Uzyskane wartości τ i d umożliwiają obserwację zmian czasu w przestrzeni fazowej. Większość zaobserwowanych obiektów geometrycznych ma formę kulistą, lecz część z nich posiada niewielkie struktury (rys. 4–6). Sygnały wibroakustyczne przetworzono z zastosowaniem filtrów FIR i IIR (Butterworth), które odcinają składową stałą, a dominujące pasmo częstotliwości jest takie same dla wszystkich sygnałów. Filtry IIR dla rozważanych sygnałów okazały się niestabilne a w trakcie projektowania filtra nie odnotowano jego wpływu na charakterystykę fazową. Ostatecznie można było zastosować filtry FIR, które są bardziej stabilne i posiadają liniową charakterystykę fazową.



Rys. 4. Obraz fazowy w trójwymiarowej przestrzeni fazowej jako rzut obrazu z przestrzeni wielowymiarowej: a – dla sygnału bez filtracji ($n = 650$ obr/min), cylinder 4 bez spalania, kierunek X ($\tau = 12$ i $d = 6$) i b – sygnał poddany filtracji ($\tau = 5$ i $d = 6$)



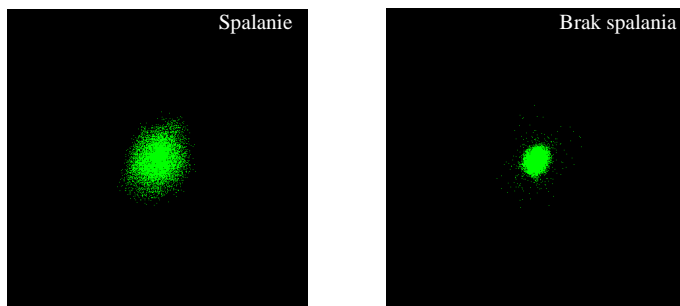
Rys. 5. Obraz fazowy w trójwymiarowej przestrzeni fazowej jako rzut obrazu z przestrzeni wielowymiarowej: a – dla sygnału bez filtracji ($n = 1100$ obr/min), wszystkie cylindry ze spalaniem, kierunek Y ($\tau = 13$ i $d = 5$) i b – sygnał poddany filtracji ($\tau = 4$ i $d = 6$)



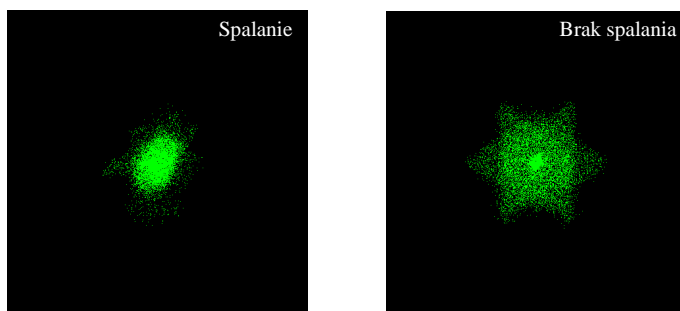
Rys. 6. Obraz fazowy w trójwymiarowej przestrzeni stanu z przestrzeni wielowymiarowej: a – dla sygnału bez filtracji ($n = 1500$ obr/min) wszystkie cylindry pracują, kierunek Z ($\tau = 13$, $d = 5$), b – po filtracji ($\tau = 9$, $d = 6$)

Analiza sygnału reprezentującego proces spalania i fragmentów cyklu pracy silnika, w którym nie wystąpił zapłon umożliwia wskazanie jakościowych zmian w portrecie fazowym również w przestrzeni dwuwymiarowej. Rozważane zmiany dotyczą również prędkości, dzięki czemu można wnioskować o ilości dostarczonej do układu energii niezbędnej do wykonania ściśle określonego procesu (w tym przypadku procesu spalania). Przyrost energii jest współzależny między innymi od ilości paliwa dostarczonego do przestrzeni roboczej silnika. Zmiany dotyczą również konwersji powyższej formy energii w inną jej postać. Dostrzegalne jest to przy porównaniu kształtów portretów fazowych dla powyższych dwóch grup sygnałów, tych które dotyczą procesu spalania i pozostałych, reprezentujących zjawisko wypadania zapłonu. Zmiany prędkości dla rozważanych punktów wskazują na reprezentację nieliniową sygnału od procesu głównego (rys. 7 i 8).

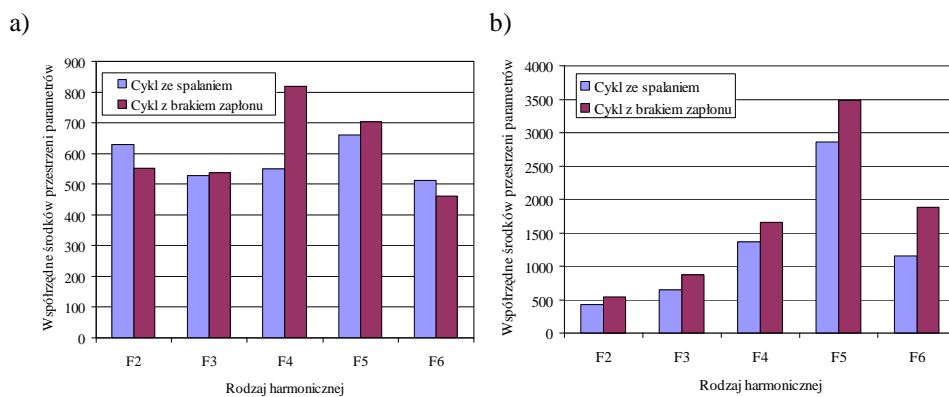
Jak ważna jest poprawna reprezentacja okna czasowego w dokładności i jednoznaczności uzyskanych parametrów stanu i ich oddalenia od środka orbity portretu fazowego świadczą wyniki przedstawione na rys. 9, gdzie dostrzega się uzyskanie jednoznaczności zmian parametrów przy 10-krotnym zmniejszeniu szerokości okna czasowego ocenianego procesu.



Rys. 7. Obraz fazowy w dwuwymiarowej przestrzeni fazowej jako rzut obrazu z przestrzeni wielowymiarowej sygnału bez filtracji dla $n = 1100$ obr/min ($\tau = 3$ i $d = 5$, cylinder nr 4, kierunek Z)



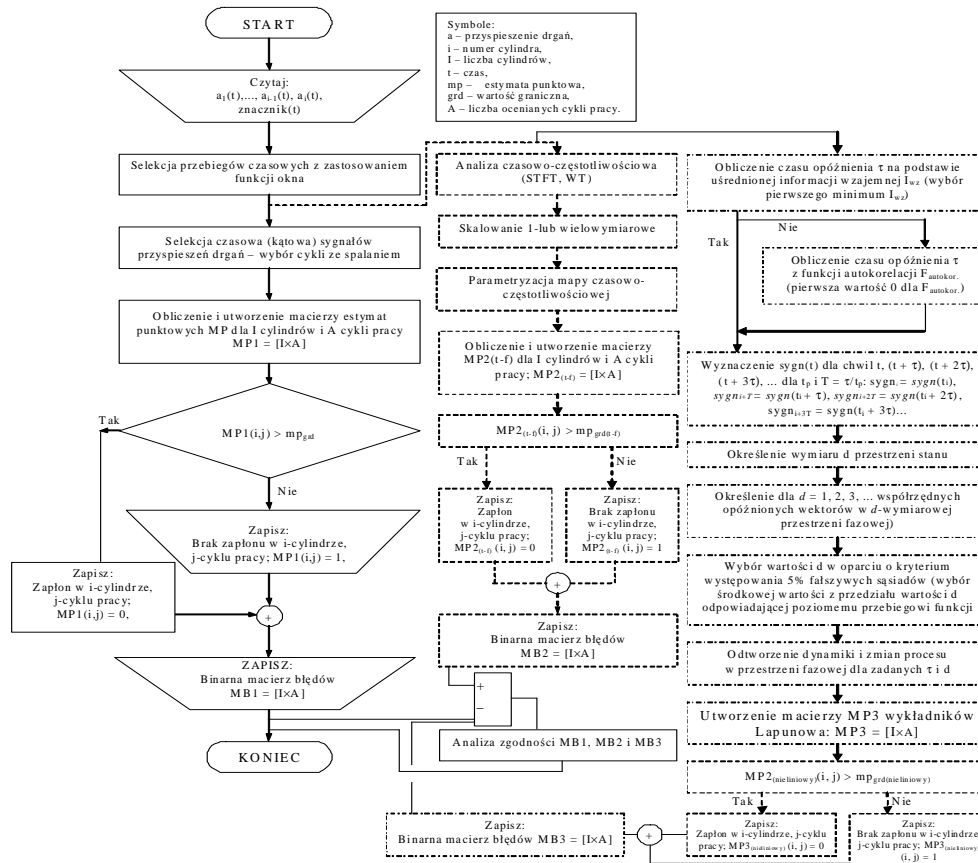
Rys. 8. Obraz fazowy w dwuwymiarowej przestrzeni fazowej jako rzut obrazu z przestrzeni wielowymiarowej sygnału bez filtracji dla $n = 1500$ obr/min ($\tau = 3$ i $d = 5$, cylinder nr 4, kierunek Z)



Rys. 9. Wpływ braku zapłonu oraz szerokości okna czasowego na średnie współrzędne wielowymiarowej przestrzeni parametrów stanu dla $\Delta t = 0,1$ s (a) i $\Delta t = 0,01$ s (b)

4. ALGORYTM NIELINIOWY POPRAWNOŚCI PROCESU SPALANIA W SILNIKU ZS

Uzyskane wyniki badań i zależności między parametrami procesów umożliwiają zbudowanie algorytmu oceny poprawności przebiegu procesu spalania w silniku z zastosowaniem teorii chaosu deterministycznego. Niniejszy algorytm bazuje na wykorzystaniu parametrów sygnału drganiowego uzyskanego z przetwornika przyspieszeń drgań rejestrującego sygnał odpowiedzi na wymuszenie od procesu spalania, które jest przenoszone przez głowicę na element pomiarowy systemu wibroakustycznego. Dziedzina analizy obejmuje przebiegi czasowe sygnału, miary amplitudowe procesu i dziedzinę częstotliwości. Algorytm nieliniowy uzupełniono o równoległe analizy miar procesu i częstotliwości oraz czasowo-częstotliwościowe, aby uzyskana diagnoza była jednoznaczna. Dzięki powyższemu działaniu możliwe jest dokładne zdefiniowanie nieprawidłowości w procesie spalania i ocena ilościowa powyższych zmian (rys. 10).



Rys. 10. Algorytm oceny poprawności przebiegu procesu spalania w oparciu o estymaty procesu wibroakustycznego i analizę nieliniową sygnału

5. WNIOSKI

Przeprowadzone badania dowiodły, iż wartości maksymalnych wykładników Lapunowa mieściły się w przedziale wartości 0,2–0,5. Wzrost powyższych wykładników odnotowano dla braku zapłonu (średnio o 17,9%), co wskazuje na wzrost składowej chaotycznej braku zapłonu. Najbardziej stabilne i ogólne wyniki uzyskano dla prędkości obrotowej silnika $n = 1500$ obr/min (średni wzrost o 16,5%) i dla 1100 obr/min (średni wzrost o 4,6%). Dla prędkości równej 650 obr/min średni wzrost wykładników Lapunowa wyniósł 32,7%, lecz w tym przypadku wyniki były niestabilne a wartości τ opóźnienia czasowego różniły się dla spalania i braku zapłonu. Należy również odnotować, iż warunki pracy dla biegu jałowego były bardzo niestabilne.

Biorąc pod uwagę jedynie sygnały uzyskane dla 1100 obr/min i 1500 obr/min, można odnotować średni wzrost maksymalnego wykładnika Lagunowa dla trzech wybranych kierunków rejestracji sygnałów odpowiednio: dla kierunku Y – 4,75%, dla kierunku Z – 19,6% a dla kierunku X – 7,4%.

Maksymalne wykładniki Lapunowa dla wszystkich sygnałów były dodatnie, co oznacza, iż występują składowe chaotyczne w sygnale i ich można określić ich dynamikę. Obliczone wartości opóźnienia czasowego τ i wymiaru d okazały się uzasadnione. Wymiar d nie był zbyt duży, dzięki czemu możliwe jest odnalezienie niskowymiarowego zachowania chaotycznego. Należy podkreślić występowanie znacznych różnic w maksymalnych wykładnikach Lapunowa dla wszystkich cylindrów pracujących w sposób prawidłowy i dla przypadku braku spalania w cylindrze. Wykładniki Lapunowa mogą stanowić parametry diagnostyczne brane pod uwagę w algorytmie wykrycia wypadania zapłonu zaprezentowanym w powyższej pracy. Ważne jest uzyskanie dobrego i racjonalnego przetwarzania sygnałów, uwzględniającego proces usunięcia składowej związanej z szumem, i filtrowania. Przetwarzanie sygnałów musi być zrealizowane ze szczególną troską z uwagi na nierozważne usunięcie składowych sygnałów zawierających użyteczne informacje o procesie dynamicznym. Ostateczny wymiar metody fałszywych sąsiadów zależy od wartości granicznej kryterium, który klasyfikuje sąsiadów jako fałszywych lub prawdziwych. Graficzne przedstawienie zmian wymiaru d w odniesieniu do wartości granicznej kryterium pozwala na odnalezienie głównego *plateau*, dzięki czemu możliwy jest właściwy wybór wartości granicznej i ostatecznego wymiaru.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Awrejcewicz J., Krysko Yadim A.: Dynamika chaotyczna belek płyt i powłok Metody numeryczne Bubnowa-Galerkina i różnic skończonych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [2] Awrejcewicz J.: Drgania deterministyczne układów dyskretnych. Wydawnictwa Naukowo-techniczne. Warszawa 1996.
- [3] Barczewski R.: Application of the Short Time Fourier Transform (STFT) with Amplitude and Frequency Correction (AFC) to non-linear system free vibration signal analysis. Report: CRI Hannover –DAAD, November 1997.
- [4] Kantz H., Schreiber T.: Non-linear Time Series Analysis, Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- [5] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W.: Diagnostyka procesów. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.

-
- [6] Kudrewicz J.: Fraktale i chaos. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
 - [7] Merkisz J., Bogus P., Grzeszczyk R., Wrona A.: On-board diagnostic system for vehicle state assessment. Silniki spalinowe, Polskie Towarzystwo Naukowe Silników Spalinowych, nr 2, Bielsko-Biała 2011.
 - [8] Merkisz J., Mazurek St.: Pokładowe systemy diagnostyczne pojazdów samochodowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2007.
 - [9] Mitra, S.K., Kaiser J. F. (eds.): Handbook for Digital Signal Processing. John Wiley & Sons, 1993.
 - [10] Osowski S.: Modelowanie i symulacja układów i procesów dynamicznych. Wydawnictwo politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007.
 - [11] Ott E.: Chaos w układach dynamicznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1997.
 - [12] Wang W. J, Chen J., Wu X. K., Wu Z. T.: The application of some non-linear methods in rotating machinery fault diagnosis. Mechanical Systems and Signal processing (2001) 15(4), 697-705.