

Diagnostyka pokładowa silników wysokoprężnych z wykorzystaniem nieliniowych metod analizy sygnałów

Omówiono zastosowanie metod nieliniowej analizy sygnałów, bazujących na teorii chaosu deterministycznego, do diagnostyki silnika wysokoprężnego na bazie sygnałów wibroakustycznych pozyskiwanych z silnika. Silnik spalinowy, obok zachowań stochastycznych i regularnych, wykazuje również zachowania chaotyczne, co może być wykorzystane do usprawnienia jego diagnostyki, szczególnie w perspektywie wprowadzenia obligatoryjnych systemów diagnostyki pokładowej. Przedstawiono krótki opis podstawowych metod analizy nieliniowej oraz przykład zastosowania analizy chaotycznej do sygnałów wibracyjnych pochodzących od czujników przyspieszenia zainstalowanych na korpusie silnika.

1. Wstęp

Ostatnie lata pokazują stały rozwój systemów diagnostyki pokładowej (amerykańska norma OBD II i europejska EOBD) w samochodach osobowych. Systemy te mają za zadanie stałe monitorowanie podstawowych elementów związanych z układem napędowym. Główny nacisk położony jest na te parametry, które związane są z emisją wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń do atmosfery. Rozwój systemów OBD wyeliminuje, w przyszłości, pozapokładowe systemy pomiarowo-diagnostyczne, zastępując je jednym, zunifikowanym systemem pokładowym.

W zakresie silników lokomotyw spalinowych istnieją wprowadzone normy emisji spalin (karty UIC 623 [22,23,24]) ale nie pojawiły się do tej pory obligatoryjne systemy diagnostyki pokładowej. Jednak w najbliższej przyszłości należy spodziewać się, obok coraz niższych norm emisji spalin, również konieczności wprowadzenia systemów diagnostyki pokładowej podobnych do OBD dla samochodów osobowych [18].

Stały rozwój systemów OBD wymusza poszukiwanie nowych rozwiązań w zakresie kontroli, sterowania i diagnostyki silników spalinowych. Szczególnie w zakresie silników wysokoprężnych dużej mocy dla lokomotyw spalinowych będzie to wymagało nowych metod diagnostycznych. Szczególnie dobrze do tego celu wydaje się nadawać analiza sygnałów wibroakustycznych pozyskanych z silnika wraz z wykorzystaniem nieliniowych metod analizy sygnałów bazujących na teorii chaosu deterministycznego.

Teoria chaosu deterministycznego (krótko teoria chaosu) stanowi nieliniowy opis układów dynamicznych. Teoria ta jest rozwinięciem klasycznej teorii dynamiki układów liniowych [2, 13, 19, 21]. Chaos deterministyczny jest opisywany jako: „nieprzewidywalne długoczasowe zachowanie się deterministycznego układu dynamicznego spowodowane wrażliwością na warunki początkowe” albo też „nieregularna i nieprzewidywalna ewolucja wielu nieliniowych układów dynamicznych”.

Okazuje się, że wiele procesów z zakresu techniki, opisujących np. urządzenia elektroniczne i mechaniczne, zawiera w swojej dynamice element nieliniowości [1, 2, 7, 8, 10, 11, 12, 15]. Fakt ten można wykorzystać dla usprawnienia monitorowania, diagnostyki i sterowania urządzeń technicznych.

2. Analiza sygnałów czasowych z użyciem metod chaosu deterministycznego

Założono, że dany jest pewien spróbkowany sygnał czasowy $x(t)$. Zasadniczą ideą analizy sygnałów z wykorzystaniem metod chaosu deterministycznego jest założenie, że przestrzeń w której należy oglądać dynamiczną strukturę sygnału nie jest jednowymiarową przestrzenią możliwych wartości $x(t)$ ale, że ewolucja dynamiczna zachodzi w przestrzeni wektorów $w(t)$ wyższego wymiaru [1, 2, 19, 21]. Przejścia do tej przestrzeni dokonuje się poprzez tzw. zanurzenie szeregu czasowego na bazie wybranego opóźnienia czasowego (ang. time-delay embedding). W praktyce dąży się do zidentyfikowania przestrzeni formalnie równoważnej oryginalnej przestrzeni fazowej układu i do takiej identyfikacji używa się współrzędnych utworzonych z obserwowanych zmiennych oraz ich opóźnień. Wybiera się okres czasu τ , po czym oblicza wartości sygnału po czasie τ , czyli bierze się pod uwagę wektory

$$x_i = x(t_i), \quad x_{i+1} = x(t_i + \tau) \quad (1)$$

Dalej, dla odtworzenia ewolucji w n -wymiarowej przestrzeni stanu konstruuje się odpowiednie n -wymiarowe wektory $a = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ utworzone, na przykład, z kolejno wybieranych n -elementowych ciągów

$$\begin{aligned} a_1 &= (w_1=x_1, w_2=x_2, \dots, w_n=x_n), \\ a_2 &= (w_1=x_2, w_2=x_3, \dots, w_n=x_{n+1}), \\ a_3 &= (w_1=x_3, w_2=x_4, \dots, w_n=x_{n+2}), \\ &\vdots \end{aligned} \quad (2)$$

Są to tzw. wektory opóźnienia czasowego. Kolejne wektory $a_1, a_2, a_3, \dots$ wyznaczają ewolucję w n -wymiarowej przestrzeni stanu.

Charakterystyczny czas opóźnienia czasowego τ znajduje się jako pierwsze miejsce zerowe funkcji autokorelacji sygnału albo jako pierwsze minimum uśrednionej informacji wzajemnej (ang. average mutual information). Jeśli oznaczy się:

$P = \{P_m\}_{m=1}^M$ – szereg czasowy,

$Q = \{Q_n\}_{n=1}^N$ – drugi szereg czasowy (np. szereg P z pewnym przesunięciem czasowym),

$S = \{S_{mn}\}_{m,n=1}^{M,N}$ – szereg dwuwymiarowy, gdzie S_{mn} to rozkłady łączne,

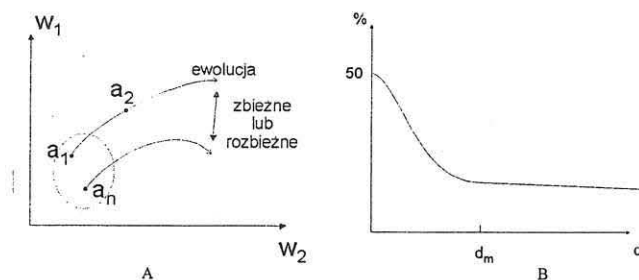
H – entropia,

to informacja wzajemna (ang. mutual information) jest zdefiniowana następująco:

$$W(S) = H(Q) + H(P) - H(S). \quad (3)$$

Mając dane τ można oszacować właściwy wymiar przestrzeni fazowej, w której odtwarza się dynamikę systemu. Stosuje się wówczas metodę najbliższych fałszywych sąsiadów (ang. nearest neighbour method), w której próbuje się odtworzyć dynamikę dla kolejno 1, 2, 3, ..., m -wymiarowych przestrzeni stanu.

W odtworzonej przestrzeni stanu trajektorie zaczynające się od dwóch bliskich sobie punktów mogą w wyniku ewolucji być zbieżne albo rozbieżne (rys. 1.A). Rozbieżność może być spowodowana albo własnościami dynamiki, albo wybraniem zbyt małego wymiaru przestrzeni, w której odtwarzamy dynamikę. W przestrzeni o zbyt niskim wymiarze rozbieżność trajektorii może być bowiem efektem nie dynamiki, ale rzutowania z rzeczywistej przestrzeni stanu o danym większym wymiarze.



Rys. 1. Przykład ewolucji w przestrzeni fazowej dwuwymiarowej (A) i typowa zależność procentu fałszywych sąsiadów od wymiaru d (B)

Ostateczna ilość wymiarów, czyli ilość branych pod uwagę τ , jest określona przez odpowiedź na pytanie: kiedy struktura geometryczna utworzona w kolejnych przestrzeniach fazowych dwu, trzy i więcej wymiarowych, będzie całkowicie odfaladowana, czyli kiedy bliska odległość punktów będzie wynikiem jedynie dynamiki, a nie rzutowania w przestrzeń o mniejszym wymiarze? Jako właściwy wymiar wybiera się ten, dla którego procent sąsiadów będących wynikiem rzutowania (czyli procent fałszywych sąsiadów) obniża się znacznie i staje się niezależny od ilości wymiarów (rys. 1B).

Po odtworzeniu dynamiki systemu można dokonać analizy jakościowej zachowania się układu w przestrzeni

stanu oraz wziąć pod uwagę szereg parametrów takich jak np. wykładniki Lapunowa lub wymiary fraktalne. Parametry te mogą się stać podstawą do diagnostyki badanych systemów dynamicznych, w najprostszym przypadku, poprzez ich porównanie dla przypadku zachowań prawidłowych i nieprawidłowych.

3. Zjawiska chaotyczne w urządzeniach mechanicznych

Już od dawna dla usprawnienia monitorowania, diagnostyki i sterowania układami mechanicznymi, do opisu ich dynamiki, próbowano wprowadzać elementy nieliniowości. Jednak dokonywano tego nie wprost, bazując zasadniczo na modelach liniowych. Teoria chaosu deterministycznego lepiej nadaje się do takiej analizy, bowiem używa wprost modeli nieliniowych. W literaturze, w ostatnich czasach, pojawił się nawet termin „chaos inżynierski” dla opisanego zastosowania teorii chaosu deterministycznego dla celów inżynierskich, w tym również przemysłowych [11]. Obserwuje się więc coraz szersze wejście zagadnień chaosu deterministycznego do szeroko rozumianej techniki i nauk inżynierskich.

Zjawiska chaotyczne można zauważyć, w szczególności, w urządzeniach mechanicznych, w których występuje ruch obrotowy lub posuwisty [7, 15]. W urządzeniach tych ponad 70% defektów objawia się nienormalnymi wibracjami i hałasami. Pomiaru wibracji i podobnych wielkości okazują się jedną z efektywniejszych metod diagnostyki urządzeń mechanicznych [11]. Jako przykłady zastosowań metod chaosu deterministycznego można opisać diagnozowanie defektów w obrotowym systemie mechanicznym składającym się z przekładni planetarnych. Część defektów takich jak np. uszkodzenia łożysk lub szorstkie powierzchnie zębów nie wymagają użycia metod chaosu deterministycznego, bowiem można je identyfikować używając klasycznej analizy Fourierskiej. Okazuje się jednak, że inne uszkodzenia jak np. karby i nacięcia powierzchni zębów nie mogą być wykryte metodami konwencjonalnymi, można je jednak wykrywać metodami nieliniowymi opartymi na chaosie deterministycznym [11].

Innym przykładem zastosowań opisu nieliniowego może być analiza dynamiki obrotów tokarki. Powszechnie zakłada się, że obroty tokarki mogą być zjawiskami liniowymi, stochastycznymi lub chaotycznymi. Pokazuje się istnienie nisko-wymiarowego chaosu podczas analizy sygnałów pochodzących od pracującej i obracającej się tokarki [7, 12, 15]. W ogólności silniki oraz inne urządzenia mechaniczne stanowią klasę tzw. mechanicznych systemów uderowych, w których zjawiska chaotyczne przewidywane są zarówno teoretycznie jak i wykrywane praktycznie [12, 14, 15]. Modele dynamiczne procesów zachodzących w silnikach mogą prowadzić w niektórych warunkach do chaosu [12, 20].

4. Diagnostyka silników spalinowych z użyciem metod chaosu deterministycznego

Silniki wysokoprężne mogą być źródłem dużej ilości sygnałów nadających się do analizy – wystarczy tutaj wymienić sygnały wibracyjne od czujników przyspieszeń korpusu silnika, całość sygnałów akustycznych, sygnały pochodzące od detektorów prądów jonowych, sygnały reprezentujące prędkość kątową wału korbowego, sygnały ciśnieniowe, nie wspominając o sygnałach wizyjnych odtwarzających np. nagrzanie głowic silników [16, 17]. Można się spodziewać,

że w wielu tych sygnałach, obok zachowań stochastycznych i regularnych, mogą się ujawnić zachowania chaotyczne.

Mając dany jeden z wymienionych powyżej sygnałów można poddać je klasycznym metodom analizy sygnałów takim jak funkcja korelacji i autokorelacji, techniki estymacyjne, filtracyjne i widmowe z użyciem, między innymi, transformaty Fourierowskiej, analizy falkowej itp., gdzie źródło sygnału rozważa się jako układ liniowy. Ten sam sygnał, szczególnie jeśli powyżej wymienione metody zawiodą, można następnie analizować biorąc pod uwagę metody teorii chaosu deterministycznego [1], w których bada się przestrzeń stanu i próbuje tam odtworzyć dynamikę układu.

Silnik spalinowy wykazuje zmienność wyzwalanej z cyklu na cykl energii. Tzw. zmienność cykliczna (ang. cyclic variability CV) opisywana jest w literaturze na sposób stochastyczny, deterministyczny liniowy i deterministyczny chaotyczny. Od dawna też prowadzona jest dyskusja na temat prawdziwej natury CV.

Analiza nieliniowa zaczęła już odgrywać pewną rolę w modelowaniu dynamiki silników. Odnalezienie zachowań chaotycznych w sygnałach wytwarzanych przez silniki spalinowe może pozwolić na lepsze poznanie dynamiki procesów zachodzących w tych silnikach [8, 9, 12, 14, 20]. Na przykład z modelu zaprezentowanego w pracy Dawa [8] wynika, że w zależności od współczynnika A/F zachowanie się silnika może okazać się czysto stochastyczne, lub też bywa mieszaniną zachowań stochastycznych i dynamiki nieliniowej. Autorzy zaproponowali tam podejście łączące elementy stochastyczne oraz nieliniowo dynamiczne i skoncentrowali się na uśrednionym po n -cyklach silnika bilansie masy i wyzwalanej energii. Rezultatem modelu było nieliniowe odwzorowa-

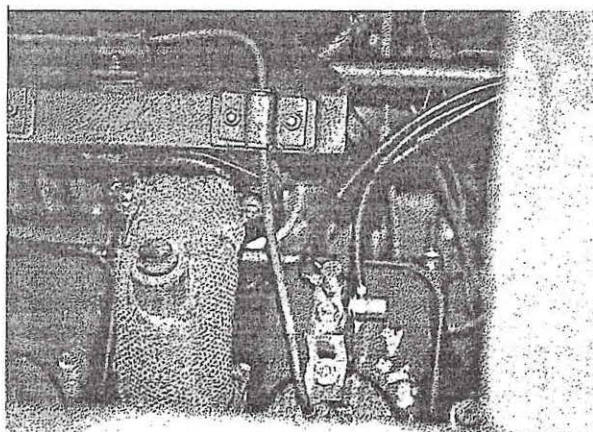
nie dające cykliczną sekwencję czasową spalania podobną do rzeczywistego silnika.

Analiza chaotyczna powinna pozwolić na diagnozowanie silników w oparciu o parametry opisujące zmiany zachowań chaotycznych w przestrzeni stanu, takie jak wykładniki Lapunowa i wymiary fraktalne. Wydaje się, że badanie takich parametrów związanych z zachowaniami chaotycznymi powinno pomóc w wykryciu wielu defektów pracy silnika np. wypadania zapłonu. Każdy taki defekt powinien się objawiać w jakościowych zmianach zachowań w przestrzeni stanu.

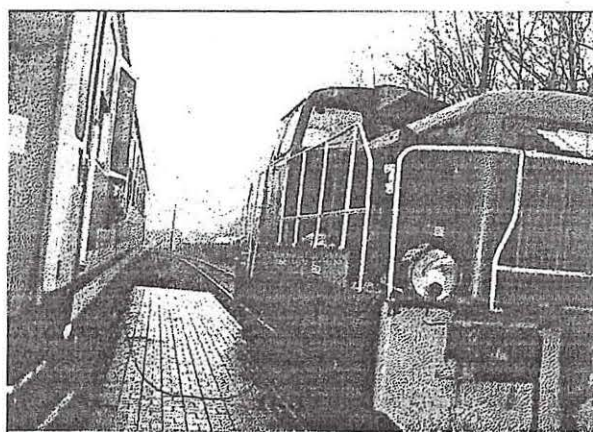
5. Rezultaty badań

W przeprowadzonych badaniach metody nieliniowe zastosowano do wykrywania zjawiska wypadania zapłonu w silniku wysokoprężnym lokomotywy spalinowej. Zjawisko wypadania zapłonów symulowano przez niedopuszczenie do procesu spalania w jednym cylindrze silnika poprzez zamknięcie dopływu paliwa do danego cylindra (odłączenie wtryskiwacza).

Czujnik przyspieszeń został przymocowany do korpusu silnika w wybranym arbitralnie miejscu, tak, aby można było określić dokładnie kierunki pomiaru przyspieszeń (fot. 1). Do badań wykorzystany został 16-kanalowy rejestrator cyfrowy typu TA11 firmy Gould bazujący na czujniku piezoelektrycznym 4395 firmy Brüel & Kjær, programie akwizycji danych Gould Acquire TA-D oraz programie analizy wyników DASA VIEW II firmy Gould. Badania wykonano na lokomotywie 401Da – 427 z silnikiem 16H12A Henschel – 12V firmy Wola.



A



B

Fot. 1. Przykładowe zamocowanie czujników na korpusie silnika (A) oraz ogólny widok lokomotywy spalinowej i wagonu pomiarowego (B).

Badania objęły:

1) zakresy prędkości, przy których wykonywane były pomiary:

- a) $n_1 = 650 \div 680$ obr/min (bieg jałowy),
- b) $n_2 = 1100$ obr/min,
- c) $n_3 = 1500$ obr/min,

2) fazy pomiarowe:

- a) faza 1 – wyznaczano przebiegi czasowe sygnałów z czujnika, który umieszczony jest na pierwszym cylindrze; warunki pomiaru: wszystkie cylindry pracują,
- b) faza 2 – czujnik umieszczony na pierwszym cylindrze, który nie pracuje,
- c) faza 3 – czujnik umieszczony jest na pierwszym cylindrze, a nie pracuje czwarty cylinder.

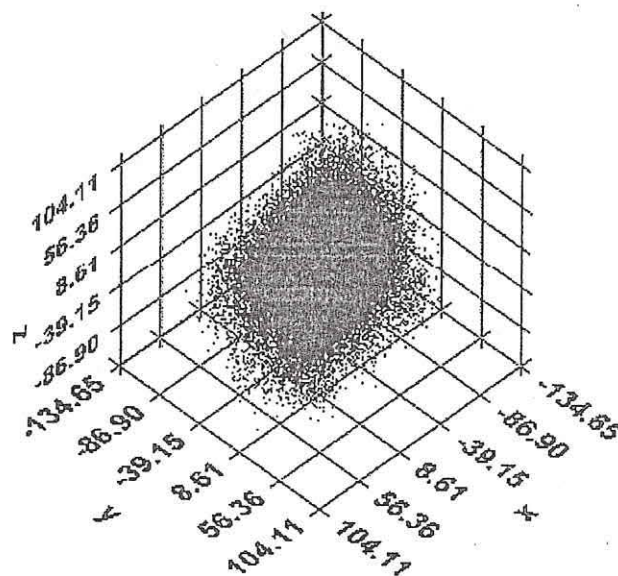
Przykładowy przebieg sygnału pokazuje rys. 2. Sygnały uzyskane podczas pomiarów dla silnika lokomotywy poddano nieliniowej obróbce danych. Do analizy nieliniowej wykorzystano dostępne w Internecie oprogramowanie NDT (Nonlinear Dynamics Toolbox), pakiet CDA (Chaos Data Analyser) oraz pakiet TISEAN. Do dodatkowych obliczeń (np. filtrowania i analizy chwilowej) wykorzystano oprogramowania MATLAB z wybranymi Toolboxami.

Czas opóźnienia τ był obliczany zarówno jako pierwsze miejsce zerowe funkcji autokorelacji COR oraz jako pierwsze minimum uśrednionej informacji wzajemnej AMI. Jako ostateczną wartość τ dla dalszych obliczeń przyjmowano raczej wynik analizy przy użyciu uśrednionej informacji wzajemnej AMI, a to ze względu na nieliniowy charakter uśrednionej informacji wzajemnej, w przeciwieństwie do funkcji autokorelacji, która reprezentuje właściwości liniowe.

Z kolei wymiar zanurzenia d wyznaczany był metodą najbliższych fałszywych sąsiadów FNN. W metodzie FNN podczas analizy wykresów zależności procentu fałszywych sąsiadów od wymiaru d jako wymiar zanurzenia brano pod uwagę przypadek, gdy wykres zależności procentu fałszywych sąsiadów spadnie do wartości 5%. Wartość progu wybrano jako $FC=17$ [3, 4, 5, 6].

Dla sygnałów pozyskanych z silnika lokomotywy spalinowej przy pomocy rejestratora Gould wartość opóźnienia czasowego mieściła się w zakresie $\tau = 12 \div 14$ (gdzie $\bar{\tau} = 12.78$), a wymiar zanurzenia miał wartości w zakresie $5 \div 6$ (gdzie $\bar{d} = 5.5$).

Otrzymane wartości τ i d pozwoliły na obserwację ewolucji czasowej w odpowiedniej przestrzeni stanu. Obserwowane tam obiekty geometryczne mają ogólny charakter kłębków przestrzennych, jednak niektóre z nich zdają się posiadać pewną strukturę. Na rys. 2. pokazano przykładowy obiekt w trójwymiarowej przestrzeni utworzony poprzez rzutowanie z oryginalnej 6-wymiarowej przestrzeni odtworzonej dla sygnału 1500 obr/min. Trajektoria jest reprezentowana przez rozkład 65536 punktów reprezentujących wektory uzyskane metodą opóźnienia czasowego.



Rys. 2. Obraz ewolucji w 6-wymiarowej przestrzeni stanu uzyskanej metodą opóźnienia czasowego rzutowany na przestrzeń trójwymiarową (trzy pierwsze wymiary x , y i z) dla sygnału 1500 obr/min z odłączonym 1 cylindrem pozyskany w kierunku poziomym wzdłużnym równoległym do osi głównej lokomotywy (czysty sygnał, bez filtracji, zanurzenie przy wartościach $\tau=13$, $d=6$)

Sygnały wibroakustyczne uzyskane z silnika lokomotywy spalinowej poddano dodatkowo obróbce wstępnej z użyciem nierekursywnego filtra pasmowego FIR (wycięta została składowa stała oraz pasmo odpowiadające dominującym częstotliwościom, które są identyczne dla porównywanych sygnałów).

Podstawowym parametrem obliczanym dla sygnałów był maksymalny wykładnik Lapunowa. Wykładniki Lapunowa są miarą zbieżności lub rozbieżności trajektorii w przestrzeni fazowej, ściślej reprezentują średnią szybkość zbieżności (lub rozbieżności) dwóch bliskich trajektorii (zbieżność dla $\lambda < 0$ i rozbieżność dla $\lambda > 0$). W ogólności jest tyle wykładników Lapunowa, ile wymiarów przestrzeni fazowej. Wykładniki Lapunowa wyznaczają tzw. horyzont predykcji, czyli czas ponad który nie daje się przewidzieć ewolucji systemu [1, 2, 19, 21].

Maksymalny wykładnik Lapunowa obliczany był z użyciem oprogramowania NDT, gdzie używa się zmodyfikowanej metody Alana Wolfa.

Program NDT oblicza wykładniki Lapunowa iteracyjnie dla kolejnych próbek sygnału, aż do jego końca. W związku z tym wykładniki Lapunowa podawane są zazwyczaj w umownych jednostkach „na jedną iterację”, czyli „na jedną próbkę”. Oczywiście znając częstotliwość próbkowania można je przeliczyć na jednostkę czasu.

Analiza wartości wykładników Lapunowa pokazała, że dopiero dla sygnałów odfiltrowanych zaczyna się obserwować pewne znaczące tendencje. Przede wszystkim widać, że maksymalne wykładniki Lapunowa są większe dla stanu nieprawidłowego (gdy jeden cylinder nie działa; stanu wypadania zapłonu). Podsumowanie wyników jest pokazane w tabeli 1 [3, 4, 5, 6].

Procentowe zwiększanie się maksymalnego wykładnika Lapunowa dla sygnałów pozyskanych z silnika lokomotywy spalinowej przy użyciu rejestratora Gould (sygnały po filtracji)

Tabela 1

	Średni procent wzrostu
wszystkie przypadki	17.9%
przypadek, gdy nie pracuje cylinder 1	16.3%
przypadek, gdy nie pracuje cylinder 4	19.5%
dla 1500 obr/min	16.5%
dla 1100 obr/min	4.6%
dla 650 obr/min	32.7%
łącznie dla 1500 obr/min oraz 1100 obr/min	10.6%
łącznie dla 1500 Obr/min oraz 1100 Obr/min w kierunku 1	4.75%
łącznie dla 1500 Obr/min oraz 1100 Obr/min w kierunku 2	19.6%
łącznie dla 1500 Obr/min oraz 1100 Obr/min w kierunku 3	7.4%

6. Podsumowanie

Czas opóźnienia τ dla większości przypadków odpowiadał wartości 6, jednak rozrzut wartości opóźnień τ , tak samo jak też uzyskanych wymiarów d był znaczny. Porównując wyniki dla silnika pracującego w warunkach prawidłowych i nieprawidłowych nie można sformułować całkowicie jednoznacznych wniosków na temat maksymalnych wykładników Lapunowa, chociaż dało się zauważyć tendencję, że jego wartości były wyższe dla przypadku nieprawidłowej pracy silnika.

Należy podkreślić, że dopiero dla odfiltrowanych sygnałów otrzymane wyniki okazały się godne uwagi. Podstawowe rezultaty są następujące:

- otrzymywane wartości maksymalnych wykładników Lapunowa LE_{max} zawierały się w zakresie ok. $0.2 \div 0.5$,
- z wyjątkiem jednego przypadku, otrzymano zwiększenie się maksymalnego wykładnika Lapunowa dla przypadku wypadania zapłonu (odłączony cylinder) – średnio o 17.9% – pokazuje to, między innymi, że w przypadku wypadania zapłonu (odłączenia cylindra) zwiększa się składowa chaotyczna sygnału,
- najbardziej stabilne i jednoznaczne wyniki otrzymano dla prędkości obrotowej 1500 obr/min (zwiększenie średnio o 16.5%) oraz dla prędkości obrotowej 1100 obr/min (zwiększenie było średnio o 4.6%),
- wprawdzie dla 650 obr/min zwiększenie było średnio o 32.7%, ale równocześnie w tym zakresie prędkości obrotowej wyniki okazały się najbardziej niestabilne,
- biorąc pod uwagę jedynie sygnały uzyskane dla prędkości obrotowych 1500 obr/min oraz 1100 obr/min, dla trzech różnych ustawień czujników uzyskano:
 - dla kierunku poziomego poprzecznego do osi głównej lokomotywy zwiększenie wartości LE_{max} średnio o 4.75%,
 - dla kierunku poziomego wzdłużnego, czyli równoległego do osi głównej lokomotywy zwiększenie wartości LE_{max} średnio o 19.6%,

- dla kierunku pionowego poprzecznego do osi głównej lokomotywy zwiększenie wartości LE_{max} średnio o 7.4%.

Uzyskane wyniki wskazują na możliwość zastosowania nieliniowych parametrów (wykładników Lapunowa) do wykrywania i odróżniania stanów odpowiadających prawidłowemu działaniu silnika i stanom odpowiadającym wypadaniu zapłonu. Wielkościami, które mogą posłużyć jako parametry diagnostyczne są wykładniki Lapunowa LE oraz wymiar korelacyjny, a przede wszystkim maksymalny wykładnik Lapunowa LE_{max} .

Z analizy uzyskanych wyników można więc wnioskować, że pomiar maksymalnego współczynnika Lapunowa w celu detekcji wypadania zapłonu powinien być przeprowadzany przy wysokich prędkościach obrotowych silnika (rzędu 1500 obr/min) a do pomiaru powinien być wykorzystany czujnik umieszczony w kierunku poziomym równoległym do osi głównej lokomotywy [3, 4, 5, 6]. Ponadto sygnały wibroakustyczne uzyskane z silnika lokomotywy spalinowej powinny zostać najpierw odfiltrowane z użyciem nierekursywnego filtra pasmowego FIR (wycina się składową stałą oraz pasmo odpowiadające dominującym częstotliwościom, które są identyczne dla porównywanych sygnałów).

Metody analizy nieliniowej są nowym narzędziem przetwarzania sygnałów. Przedstawione wyniki wskazują na przydatność metod nieliniowej analizy sygnałów do diagnostyki silnika wysokoprężnego na bazie sygnału wibroakustycznego. Dalsze badania w tym zakresie dają w perspektywie możliwość zastosowania tych metod w przyszłych systemach diagnostyki pokładowej, zainstalowanych na lokomotywie spalinowej.

Literatura

- H. D. I. Abarbanel. *Analysis of Observed Chaotic Data*. Springer, 1996.
- G. L. Baker, J. P. Gollub. *Wstęp do dynamiki układów chaotycznych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 1998.
- P. Boguś, R. Grzeszczyk, J. Merksiz. *Możliwości wykorzystania nieliniowych metod analizy opartych na chaosie deterministycznym do diagnostyki silników spalinowych w świetle wprowadzenia systemu OBDII/EOBD*. *Journal of KONES – Internal Combustion Engines*, Vol.8, No. 3-4, 2001.
- P. Boguś, J. Merksiz, M. Waligórski, R. Grzeszczyk. *Nonlinear Analysis of Exhaust Locomotive Engine Vibroacoustic Signals for Misfire Detection – OBDII/EOBD Perspectives*. *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, Vol. 9, No. 3-4, 2002.
- P. Boguś, R. Grzeszczyk, Z. Marciniak, J. Merksiz, I. Pielecha, J. Pielecha, M. Waligórski. *Badania zjawiska wypadania zapłonu w silnikach lokomotyw spalinowych – perspektywy OBDII/EOBD*. *Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej. XV Konferencja Naukowo-Techniczna „Pojazdy Szynowe 2002”, Szklarska Poręba 4-7 września 2002*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, Tom 1.
- P. Boguś, J. Merksiz, R. Grzeszczyk, S. Mazurek. *Nonlinear Analysis of Combustion Engine Vibroacoustic Signals for Misfire Detection*. *SAE Technical Paper Series. Electronic Engine Controls*. 2003-01-0354.

7. S. T. S. Bukkapatman, A. Lakhtakia, S. R. T. Kumara. Analysis of sensor signals shows turning on a lathe exhibits low-dimensional chaos. *Physical Review E*, Vol. 52, No. 3, September 1995.
8. C. S. Daw, M. B. Kennel, C. E. A. Finney, F. T. Connelly. Observing and modelling nonlinear dynamics in an internal combustion engine. *Physical Review E*, Vol. 57, No. 3, 1998.
9. C. E. A. Finney, J. B. Green, C. S. Daw. Symbolic Time-Series Analysis of Engine Combustion Measurements. SAE Paper No. 980624, Society of Automotive Engineers, Inc., 1998.
10. M. Hasler. Engineering chaos for encyryption and broadband communication. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, No. 353, 1995.
11. T. Iokibe. Industrial Application of Chaos Engineering. 2nd On-line Conference on Soft Computing in Engineering Design and Manufacturing (WSC2), 23-27 June 1997, On the Internet (World-Wide Web), <http://www.bath.ac.uk/Departments/Eng/wsc2/home.html>
12. J. Jerrelind, A. Stensson. Nonlinear dynamics of parts in engineering systems. *Chaos, Solitons and Fractals*, 11, 2000.
13. J. Kudrewicz. *Fraktale i chaos*. WNT, Warszawa, 1993.
14. Y. Lee, S. Pae, K. Min. Three-Dimensional Modeling of Knock in Spark Ignition Engines. *Proceedings of The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International)*. Seoul, Korea, July 13-16, 1999.
15. G. Luo, J. Xie. Bifurcations and chaos in a system with impacts. *Physica D*, 148, 2001.
16. J. Merkisz, M. Waligórski, P. Boguś, R. Grzeszczyk. Diagnostyka pokładowa zjawiska wypadania zapłonów w silnikach lokomotyw spalinowych. *Pojazdy Szynowe* Nr 4, 2002.
17. J. Merkisz, M. Waligórski, P. Boguś, R. Grzeszczyk. Some Insights into Diesel Locomotives Misfires for the Application of an OBD System. *Journal of KONES Internal Combustion Engines*, Vol. 9, No. 1-2, 2002.
18. J. Merkisz, M. Waligórski, P. Boguś. Możliwości i warunki zastosowania systemów podobnych do OBD w silnikach lokomotyw spalinowych. *Proceedings of 29th International Scientific Conference on Combustion Engines KONES 2003*, September 14-17, 2003, Wisła, Poland.
19. E. Ott. *Chaos w układach dynamicznych*. WNT, Warszawa, 1997.
20. J-K. Park, K-S. Bae, C. You. Dynamic Modelling and Simulation of Diesel Engine Starting Process. *Proceedings of The 15th Internal Combustion Engine Symposium (International)*. Seoul, Korea, July 13-16, 1999.
21. H. G. Schuster. *Chaos deterministyczny*. Wprowadzenie. Wydawnictwo Naukowe PWN 1995.
22. UIC 623-1. Homologacja silników spalinowych pojazdów napędnych. Wyd. 2. 1.07.1997.
23. UIC 623-2. Badania homologacyjne silników spalinowych pojazdów napędnych. Wyd. 2. 1.07.1997.
24. UIC 623-3. Badania seryjne i warunki odbioru silników spalinowych dieselskich pojazdów trakcyjnych. Wyd. 1. 1.01.1989.