

Piotr CZECH, Henryk MADEJ
Politechnika Śląska, Gliwice

WYKRYWANIE LUZU W UKŁADZIE TŁOK-CYLINDER PRZY WYKORZYSTANIU ANALIZY EMD

Słowa kluczowe

Diagnostyka, silniki spalinowe, analiza EMD.

Streszczenie

W artykule przedstawiono próbę oceny zużycia złożenia tłok-cylinder za pomocą sygnału drgań rejestrowanego na kadłubie silnika ZI. Obiektem badań był czterocylinnowy silnik spalinowy o pojemności 1,2 dm³. W badaniach zastosowano metodę empirycznej dekompozycji jako nowe podejście do diagnozowania uszkodzeń silników spalinowych. Poprzez zastosowanie tej metody w przeprowadzonych badaniach złożony sygnał drgań bloku silnika został rozłożony na szereg poziomów dekompozycji, umożliwiających rozróżnienie lokalnych właściwości sygnału w dziedzinie czasu. Uzyskane sygnały z procesu dekompozycji poddano analizie widmowej, w celu określenia ich cech energetycznych. Analizę przeprowadzono dla różnych pasm częstotliwości. Z przeprowadzonych badań wynika, że istnieje możliwość wykorzystania analizy EMD do oceny luzu w układzie tłok-cylinder.

Wprowadzenie

Do diagnozowania uszkodzeń mechanicznych silników spalinowych coraz częściej wykorzystywanym nośnikiem informacji o jego stanie jest sygnał wibroakustyczny. Systemy diagnostyczne, wykorzystywane we współczesnych silnikach spalinowych, mają na celu lokalizację elementu lub układu, który wskutek naturalnego zużycia lub doraźnego uszkodzenia nie może dalej pełnić swojej funkcji. Rosnące wymagania, dotyczące trwałości i niezawodności silni-

ków spalinowych oraz minimalizacji kosztów i niekorzystnego oddziaływania na otoczenie, powodują konieczność pozyskiwania informacji o ich stanie podczas eksploatacji [1, 2].

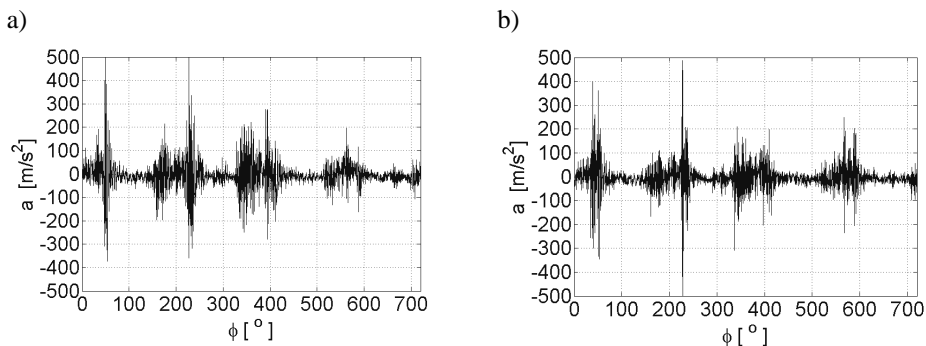
Jednym ze sposobów pozyskiwania informacji diagnostycznej jest monitorowanie poziomu drgań generowanych przez podzespoły silnika. Silnik spalinywy jest obiektem podlegającym oddziaływaniu wymuszeń wewnętrznych i zewnętrznych. Należą do nich przede wszystkim: ciśnienie spalania, ruch układu tłokowo-korbowego, wymuszenia ze strony układu rozrządu, wymuszenia wynikające z pracy osprzętu silnika.

Jednym z głównych wymuszeń, występujących w trakcie pracy układu tłokowo-korbowego, są uderzenia tłoka przy zmianie jego kierunku ruchu. Wartość wymuszenia zależy w istotny sposób od luzu pomiędzy tłokiem a ścianką cylindra [3–5], spowodowanym zużyciem eksploatacyjnym silnika. Wartość siły jest funkcją ciśnienia spalania oraz prędkości obrotowej silnika.

Celem pracy było wykorzystanie empirycznej dekompozycji sygnału (EMD – ang. *Empirical Mode Decomposition*) do oceny luzu w układzie tłok–cylinder.

1. Badania wstępne

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano sygnały drganiowe, zarejestrowane na kadłubie silnika samochodu marki Fiat Panda z silnikiem ZI o pojemności 1,2. Pomiary wykonywano na hamowni podwoziowej FLA 203 firmy BOSCH, z wykorzystaniem przetworników przyspieszeń drgań typu ICP oraz karty akwizycji danych NI PCI-6143, sterowanej programem opracowanym w środowisku *LabView*. Rejestrowane przyspieszenia drgań korpusu silnika w kierunku prostopadłym do czwartego cylindra próbkowano z częstotliwością 40 kHz. Pomiary wykonywano dla prędkości obrotowej silnika 2 500 obr./min. Zarejestrowano przebiegi przyspieszeń drgań dla silnika przed i po naprawie. Naprawa silnika polegała na wymianie tłoków, przez co uzyskano zmniejszenie luzów w układzie tłok–cylinder. Przykładowe sygnały drganiowe, zarejestrowane na kadłubie silnika przed i po jego naprawie, przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przebiegi przyspieszeń drgań zarejestrowane na korpusie przed (a) i po (b) naprawie silnika

Wymiana zużytych tłoków silnika nie wpłynęła jednoznacznie na charakter zmian miar punktowych, uzyskanych z sygnałów przyspieszeń drgań w dziedzinie czasu. Wykorzystując szeroko opisane w literaturze miary, należące do statystyki opisowej [6, 7], w której można wyróżnić: grupę miar przeciętnej położenia (czyli tendencji centralnej mierzalnej cechy zmiennej), grupę miar zróżnicowania (czyli przeciętnej zmienności wariantów mierzalnej cechy zmiennej) oraz grupę miar skośności i kurtozy (czyli spłaszczenia lub spiczastości rozkładu mierzalnych wariantów cechy zmiennej), nie udało się jednoznacznie zidentyfikować stanu luzu złożenia tłok–cylinder.

W dalszej części eksperymentu zarejestrowane sygnały drganiowe poddano dekompozycji przy wykorzystaniu analizy EMD [2, 8–14].

2. Opis algorytmu dekompozycji sygnału

W przeprowadzonym eksperymencie sprawdzono przydatność empirycznej dekompozycji sygnału w diagnostyce luzu w układzie tłok–cylinder silnika spalinyowego.

Rozkład sygnału diagnostycznego $x(t)$ na skończoną sumę składowych, nazywanych funkcjami wewnętrznymi IMF (ang. *Intrinsic Mode Function*), przeprowadza się zgodnie z algorytmem [9]:

- zidentyfikowanie lokalnych minimów $l(t)$ sygnału $x(t)$,
- zidentyfikowanie lokalnych maksimów $u(t)$ sygnału $x(t)$,
- wyznaczenie średniej wartości z obwiedni minimów i maksimów $m_1(t)$,
- wyznaczenie pierwszej składowej $h_1(t)$ z zależności:

$$h_1(t) = x(t) - m_1(t) \quad (1)$$

- zidentyfikowanie lokalnych minimów $l(t)$ sygnału $h_1(t)$,
- zidentyfikowanie lokalnych maksimów $u(t)$ sygnału $h_1(t)$,
- itd.

Algorytm powtarza się do momentu, gdy:

- liczba ekstremów i zmian znaku funkcji jest równa lub różni się nie więcej niż o jeden,
- średnia wartość lokalnych minimów i maksimów jest równa zero.

Wyznaczoną wielkość nazywa się pierwszą funkcją wewnętrzną:

$$IMF_1(t) = h_1(t) \quad (2)$$

Następnie wielkość ta jest usuwana z bazowego sygnału badanego $x(t)$ i otrzymuje się pierwszą resztę $r_1(t)$:

$$r_1(t) = x(t) - IMF_1(t) \quad (3)$$

Reszta ta jest traktowana jak bazowy sygnał badany $x(t)$, a cały proces powtarza się od początku.

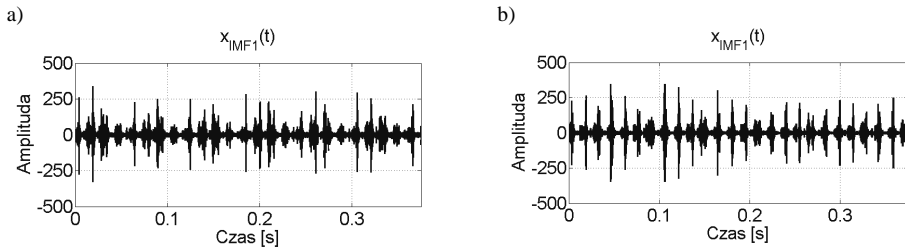
Zakończenie procesu empirycznej dekompozycji sygnału następuje, gdy reszta $r_N(t)$ jest stała lub monotoniczna.

Wynikiem działania opisanego algorytmu jest suma kolejnych funkcji wewnętrznych oraz reszta:

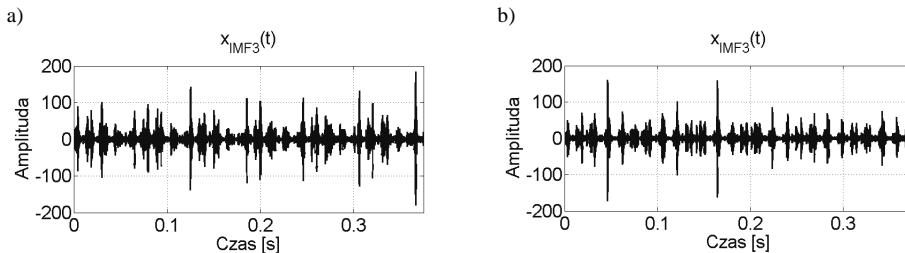
$$x(t) = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + r_N(t) \quad (4)$$

3. Wyniki eksperymentu

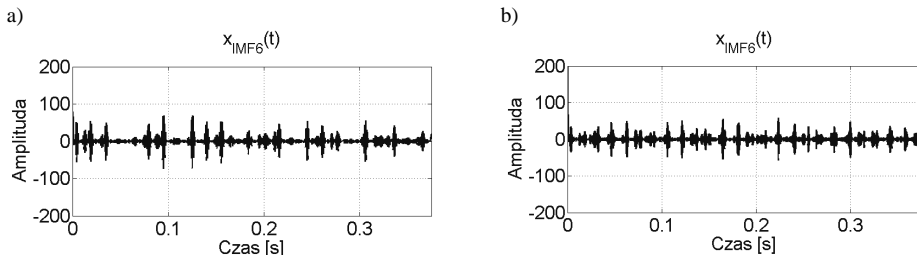
W celu sprawdzenia przydatności analizy EMD do diagnozowania luzu w układzie tłok–cylinder silnika spalinyowego, zarejestrowane przebiegi przyspieszeń drgań poddano działaniu algorytmu dekompozycji. Przykładowe wyniki przedstawiono na rys. 2–6.



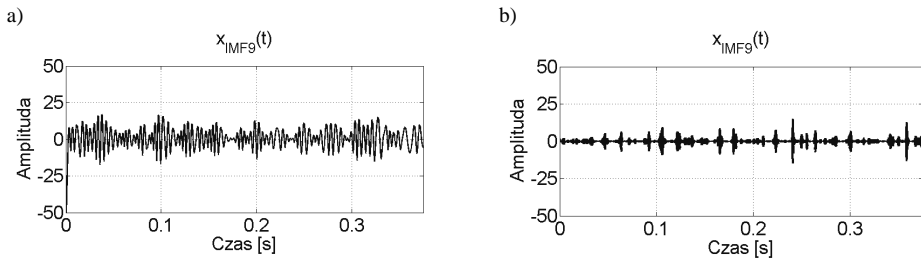
Rys. 2. Przebiegi IMF1 przyspieszeń drgań zarejestrowanych na korpusie przed (a) i po (b) naprawie silnika



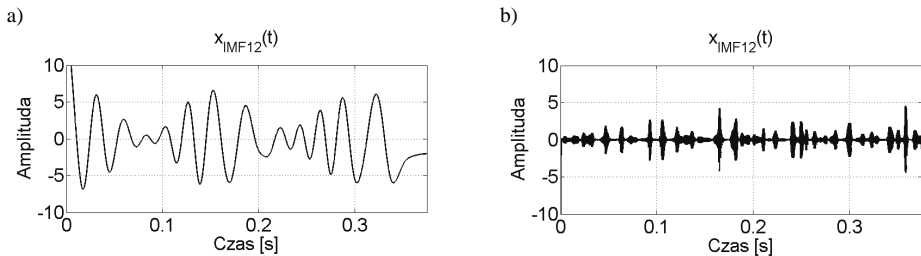
Rys. 3. Przebiegi IMF3 przyspieszeń drgań zarejestrowanych na korpusie przed (a) i po (b) naprawie silnika



Rys. 4. Przebiegi IMF5 przyspieszeń drgań zarejestrowanych na korpusie przed (a) i po (b) naprawie silnika



Rys. 5. Przebiegi IMF9 przyspieszeń drgań zarejestrowanych na korpusie przed (a) i po (b) naprawie silnika



Rys. 6. Przebiegi IMF12 przyspieszeń drgań zarejestrowanych na korpusie przed (a) i po (b) naprawie silnika

Empiryczna dekompozycja sygnału umożliwiła rozłożenie, zarejestrowanych dla silnika przed naprawą, sygnałów przyspieszeń drgań na 13 poziomów dekompozycji, natomiast po naprawie silnika na 38 poziomów dekompozycji.

Z otrzymanych po dekompozycji składowych sygnału bazowego $x(t)$ wyznaczono widma. Na podstawie wyznaczonych widm określano energię sygnału dla kolejnych poziomów dekompozycji. W celach porównawczych energię widm obliczono dla różnych zakresów częstotliwości. Dodatkowo wyznaczono również energię widma sygnału, niepoddanego algorytmowi dekompozycji sygnału. Celem lepszego zobrazowania występujących różnic w wyznaczonej energii z widm pomiędzy stanem dobrym i złym złożenia tłok-cylinder, wyniki zostały odniesione do stanu dobrego (przyjęto 100%). Następnie wyznaczono różnicę w energii widma sygnału drganiowego silnika przed i po naprawie. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 1.

Analizując uzyskane wyniki można zauważyć, że największe różnice w uzyskiwanym poziomie energii widma występują dla widm analizowanych w zakresie $0 \div 20$ kHz. W tym przypadku dla sygnałów, które nie poddano dekompozycji sygnału, zmiana energii widma pomiędzy stanem przed i po naprawie silnika jest tylko na poziomie ok. 15%. W tym samym przypadku energia

Tabela 1. Zestawienie energii z widm

Lp.	Sygnał	$\Delta E(f)$ dla zakresu widma, kHz						
		0÷20	0÷15	0÷10	0÷5	5÷10	10÷15	15÷20
1	X(f)	14,644	94,995	87,085	165,42	70,818	95,958	74,631
2	IMF1(f)	27,399	165,73	98,198	91,611	104,19	221,68	71,659
3	IMF2(f)	39,53	26,665	380,17	282,46	417,05	81,67	99,929
4	IMF3(f)	38,316	23,815	139,9	1299,8	43,946	99,988	99,903
5	IMF4(f)	67,509	63,559	45,623	103,82	99,981	99,997	99,981
6	IMF5(f)	97,366	96,829	95,914	92,746	100	99,999	99,999
7	IMF6(f)	99,465	99,378	99,237	98,855	99,97	99,969	99,969
8	IMF7(f)	99,461	99,4	99,301	99,037	99,875	99,87	99,87
9	IMF8(f)	85,437	83,285	79,696	67,831	98,339	97,968	97,958
10	IMF9(f)	10,089	16,121	25,053	81,522	84,632	58,003	57,004
11	IMF10(f)	37,963	32,427	23,8	1,2344	81,756	80,418	80,412
12	IMF11(f)	76,71	73,39	68,074	125,75	97,91	97,816	97,816
13	IMF12(f)	3,2768	1,5127	0,96511	13,061	60,007	33,948	33,064
14	IMF13(f)	5,434	0,42271	8,9837	29,074	68,808	66,036	65,912

widm sygnałów z kolejnych poziomów dekompozycji (IMF1÷8, IMF10÷11) zmienia się znacznie więcej. W przypadku analizy energii widm w innych zakresach częstotliwości uzyskiwane różnice pomiędzy sygnałami X(f) w porównaniu z większością składowych IMF są znacznie mniejsze. Dla energii widma w zakresie 0÷15 kHz najwłaściwsza wydaje się analiza widma z sygnału dekompozycji na pierwszym poziomie ($\Delta E(f) \approx 166\%$), dla zakresu 0÷10 kHz i 5÷10 kHz – drugim poziomie dekompozycji ($\Delta E(f) \approx 380\%$, $\Delta E(f) \approx 417\%$), dla zakresu 10÷15 kHz – pierwszym poziomie dekompozycji ($\Delta E(f) \approx 222\%$). W przypadku energii widm w zakresie 15÷20 kHz występuje dla większości analizowanych poziomów dekompozycji (IMF2÷8, IMF11) zmiana o ok. 100%. Najwłaściwszym zakresem widma, w którym celowym wydaje się porównanie energii sygnału, jest zakres 0÷5 kHz. Wyznaczona energia widma z tego zakresu dla trzeciego poziomu dekompozycji wykazuje zmianę o ok. 1300%.

Podsumowanie

W procesie diagnozowania zużycia złożenia tłok–cylinder silnika spalinygowego ZI na podstawie drgań kadłuba wykorzystano empiryczną dekompozycję sygnału jako sposób selekcji sygnału użytecznego. Sygnały uzyskane na podstawie analizy EMD w dziedzinie czasu poddano analizie częstotliwościowej w celu określania miar energetycznych. Przeprowadzona analiza pozwoliła na wybranie poziomów dekompozycji oraz zakresów częstotliwości wrażliwych na zużycie eksploatacyjne w układzie tłok–cylinder.

Na podstawie uzyskanych wyników badań potwierdzono przydatność energii widm sygnałów, uzyskanych na podstawie dekompozycji EMD, do wykrywania luzu w układzie tłok–cylinder.

Bibliografia

1. Dąbrowski Z., Madej H.: Masking mechanical damages in the modern control systems of combustion engines. *J. of KONES*, 2006, 13, 3.
2. Isermann R.: Diagnosis methods for electronic controlled vehicles. *Vehicle System Dynamics*, 36, 2–3.
3. Heywood J. B.: *Internal combustion engines fundamentals*. McGraw Hill Inc., 1988.
4. Madej H., Czech P.: Application the histogram of vibration spectrum of engine block for setting up the clearance model of the piston-cylinder assembly for PNN neural classifier. *Scientific Problems of Machines Operation and Maintenance*, 2008, 2(154), 43, 83–92.
5. Madej H., Czech P.: Diagnostyka drganiowa luzu w układzie tłok–cylinder z wykorzystaniem współczynników Hoeldera. 4th Intern. Congress on Technical Diagnostics, Olsztyn, 2008.
6. Cempel C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa, 1989.
7. Loutridis S. J.: Instantaneous energy density as a feature for gear fault detection. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20, 1239–1253.
8. Gao Q., et al.: Rotating machine fault diagnosis using empirical mode decomposition. *MSSP 22*, 2008, 1072–1081.
9. Huang N. E., Shen Z., Long S. R., et al.: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and nonstationary time series analysis. *Proc. of the Royal Society, London*, 1998, 454, 903–995.
10. Junsheng C., et al.: Research on the intrinsic mode function (IMF) criterion in EMD method. *MSSP 20*, 2006, 817–824.
11. Loutridis S. J.: Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition. *Engineering Structures*, 2004, 26, 1833–1841.
12. Pinesa D., Salvinob L.: Structural health monitoring using empirical mode decomposition and the Hilbert phase. *J. of Sound and Vibration*, 2006, 294, 97–124.
13. Yang Y., Yu D., Chen J.: A roller bearing fault diagnosis method based on EMD energy entropy and ANN. *J. of Sound and Vibration*, 2006, 294, 269–277.
14. Yu D., Chen J., Yang Y.: Application of EMD method and Hilbert spectrum to the fault diagnosis of roller bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2005, 19, 259–270.

Recenzent:

Zbigniew DĄBROWSKI

Detection of clearance in the piston-cylinder assembly using EMD analysis

Key words

Diagnosis, combustion engine, EMD (Empirical Mode Decomposition) analysis.

Summary

The paper presents an attempt to evaluate the wear of a piston-cylinder assembly with the aid of vibration signal recorded on the spark ignition (SI) engine body. The subject of the study was a four-cylinder combustion engine 1.2 dm³. In this research, an empirical mode decomposition (EMD) based approach for internal combustion engine fault diagnosis is investigated. EMD is a new time-frequency methods for analysing nonlinear and nonstationary signals generated by an IC engine. By using this method, the complicated vibration signal of the engine block was decomposed into an intrinsic mode function. It allowed us to differentiate local features of the vibration signal in time domain. Obtained signals were given under the analysis of the frequency domain to determine their energetic features. Analysis was conducted for various frequency bands. According to our studies, it is possible to utilise empirical mode decomposition (EMD) for the evaluation of the clearance in a piston-cylinder assembly.