



Bogdan Wysogład

Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Raciborzu

DIAGNOSTYKA ŁOŻYSK Z ZASTOSOWANIEM CIĄGÓW SUM SKŁADOWYCH BISPEKTRÓW KRÓTKOCZASOWYCH

Streszczenie (abstrakt): W artykule przedstawiono metodę diagnozowania łożysk tocznych z zastosowaniem ciągu wartości sum składowych bispektrów wyznaczanych dla kolejnych krótkich odcinków czasowych sygnału drgań. Wykazano, że zgodnie z modelem generacji drgań wywołanych punktowymi uszkodzeniami łożysk tocznych, tworzone ciągi wartości sum składowych bispektrów krótkoczasowych charakteryzują się okresowością, niosącą informację o uszkodzeniu łożyska. Niesprawność łożyska jest identyfikowana na podstawie składowych charakterystycznych uszkodzenia łożyska tocznego widma mocy ciągu sum składowych bispektrów. Przedstawiono przykłady zastosowania ciągu sum bispektrów sygnałów drgań do diagnozowania łożysk tocznych również w przypadku analizy sygnałów zarejestrowanych w obecności silnych zakłóceń wibroakustycznych.

Słowa kluczowe: analiza sygnałów, bispektra, łożyska toczne, sygnały drgań

BEARINGS DIAGNOSTICS BASED ON SEQUENCES OF SUM VALUES OF SHORT-TIME BISPECTRA

Abstract: The paper presents the identification of rolling element bearings faults based on sequences of sum values of short-time bispectra estimated for subsequent vibration signal windows. Identification of faults in roller bearings was performed on the basis of results obtained from a spectral analysis of received sequences sum values of short-time bispectral modules. According to generation models of vibration signals of damaged roller bearings, in the spectrum of a sequence of feature values, one should observe an increase in component power values by frequencies that are characteristic of faults in bearing and its harmonics. The obtained results of signal analyses for typical faults of roller bearings confirmed the efficiency of the developed method of roller bearings diagnostics.

Keywords: signal analyses, bispectra, rolling element bearings, vibration signals

Wstęp

Diagnostyka techniczna łożysk tocznych jest powszechnie stosowana w przypadku maszyn eksploatowanych w przemyśle. Metody diagnozowania łożysk tocznych w warunkach eksploatacji maszyn bazują głównie na pomiarze drgań. Poszczególne metody diagnozowania

mają ograniczoną efektywność w zależności od zakłóceń wibroakustycznych, rodzaju i wielkości uszkodzenia łożyska oraz konstrukcji maszyny (Tandon, Choudhury 1999). Badania nad rozwojem metod diagnozowania łożysk tocznych koncentrują się między innymi na wykorzystaniu zalet różnych metod analizy sygnałów diagnostycznych (Randall, Antoni 2011, Wysogład 2009).

Wyniki prac, w których wykorzystywano analizy częstotliwościowe trzeciego rzędu, czyli bispektra i bikoherencje, do diagnozowania łożysk tocznych przedstawiono w wielu artykułach (Parker i inni 2000, Xiang i inni 2018). W większości opisanych badań symptomem uszkodzenia łożyska jest charakterystyczny układ składowych bispektrum na płaszczyźnie biczęstotliwości, o podwyższonych wartościach (Pineyro i inni 2000, Guangming i inni 2015). Identyfikacja uszkodzenia na podstawie składowych bispektrum wymaga odpowiednio dużej rozdzielczości częstotliwościowej, co powoduje, że muszą być analizowane długie odcinki czasowe sygnału, w obrębie których konieczne jest zachowanie stałych relacji fazowych między składowymi sygnału. Przedstawione w (Yiakopoulos, Antoniadis 2006) badania pokazały, że nawet niewielki poślizg elementów tocznych łożyska uniemożliwia identyfikację uszkodzenia na podstawie bisppektrów.

Metoda diagnozowania z zastosowaniem ciągu wartości sum składowych bispektrów

Wyniki badań przedstawiane w wielu publikacjach wskazują, że symptomy uszkodzenia łożysk w postaci charakterystycznego układu składowych bispektrum lub bikoherencji występują tylko w wybranych przypadkach, najczęściej w sprzyjających warunkach, przy braku dużych zakłóceń wibroakustycznych (Parker i inni 2000, Zhou i inni 2012, Stack i inni 2004). Natomiast we wszystkich opisanych w literaturze badaniach zaobserwowano wzrost wartości części składowych bispektrów i bikoherencji sygnałów zarejestrowanych dla łożysk z uszkodzeniami w porównaniu do sygnałów z łożysk bez uszkodzeń (Yang i inni 2002, Radkowski 2002, Zhou i inni 2012). W przypadku braku uszkodzenia układ obejmujący łożysko i obudowę, który można uznać za liniowy, pobudzany do drgań wymuszeniem szerokopasmowym, odpowiada drganiami o rozkładzie zbliżonym do gausowskiego, co powoduje prawie zerowe wartości składowych bikoherencji i małe wartości składowych bispektrów. Uszkodzenie łożyska prowadzi do intensyfikacji zjawisk nieliniowych, co przejawia się wzrostem wartości składowych bispektrów. W początkowej fazie uszkodzenia, nazywanej niskoenergetyczną, najczęściej występują chwilowe zaburzenia przebiegu sygnału, które wywołują chwilowe zmiany struktury częstotliwościowej sygnału, przejawiające się chwilowymi niestacjonarnościami, powodującymi wzrost składowych bispektrum.

W artykule zaproponowano sposób diagnozowania łożysk z zastosowaniem ciągu sum modułów składowych bispektrów (lub bikoherencji) wyznaczanych dla kolejnych krótkich odcinków czasowych sygnału. Odcinek czasowy sygnału powinien obejmować chwilowe zmiany (zaburzenia) sygnału wywołane pojedynczym wymuszeniem pochodzącym od uszkodzenia punktowego łożyska. W badaniach przyjęto założenie, że tak utwo-

rzony ciąg wartości sum składowych bispektrów (lub bikoherencji) krótkoczasowych nie-
nie informację o stanie badanego łożyska.

Algorytm identyfikacji punktowego uszkodzenia łożyska tocznego

1. Dla kolejnych krótkich odcinków czasowych sygnału są wyznaczane bispektra (lub bikoherencje) krótkoczasowe.
2. Następnie dla każdego bispektrum krótkoczasowego jest wyznaczana wartość sumy modułów składowych bispektrum.
3. Wynikiem przeprowadzonych analiz jest ciąg wartości sum modułów składowych bispektrów krótkoczasowych wyznaczanych dla kolejnych odcinków czasowych sygnału.
4. Analiza widmowa ciągu i identyfikacja symptomów uszkodzenia łożyska na podstawie wartości składowych widma o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzenia badanego łożyska tocznego.

Wyznaczanie ciągu wartości sum składowych bispektrów krótko- czasowych

Założono, że analizowany sygnał cyfrowy x próbkowano z częstotliwością f_s , czyli ze stałym odstępem czasowym Δt . Sygnał jest dzielony na M odcinków czasowych o długości T_p , dla których są wyznaczane bispektra krótkoczasowe $B(f_1, f_2)$.

W celu estymacji bispektrum odcinek czasowy sygnału jest dzielony na K segmentów sygnału $x_k(n)$ z zastosowaniem prostokątnego okna czasowego o długości $T_N = N \cdot \Delta t$, gdzie N jest liczbą naturalną. Ze względu na wykorzystanie numerycznego algorytmu FFT przyjęto, że N jest potęgą liczby 2. Analiza jest realizowana dla segmentów sygnału częściowo zachodzących na siebie. Dla każdego segmentu sygnału $x_k(n)$ jest obliczana dyskretna transformacja Fouriera, której wynikiem jest szereg liczb zespolonych $X_k(j) = X_k(f_j)$.

Dla każdego odcinka czasowego sygnału wyznaczono bispektrum krótkoczasowe ze wzoru (Nikias i inni 1993, Yang i inni 2002):

$$B(f_1, f_2) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K X_k(f_1) X_k(f_2) X_k^*(f_1 + f_2). \quad (1)$$

Na podstawie K segmentów sygnału, składających się z N próbek każde, obliczono bispektrum $B(f_1, f_2)$ dla dyskretnych wartości częstotliwości $f_1 = i \cdot \Delta f$ i $f_2 = j \cdot \Delta f$, gdzie i i j są liczbami całkowitymi z przedziału od $-N/2$ do $N/2$, a $\Delta f = \frac{1}{T_N}$ jest rozdzielczością częstotliwościową bispektrum.

Sygnał podzielono na M odcinków czasowych, dla których obliczane są bispektra krótkoczasowe. Dla m -tego odcinka czasowego sygnału, na podstawie wzoru (1), wyznaczono bispektrum krótkoczasowe $B(f_1, f_2)$, któremu przyporządkowano chwilę czasu $t_m = m \cdot \Delta t_L + T_p/2$ odpowiadającą środkowi odcinka czasowego i oznaczono $B(m, f_1, f_2)$. Przesu-

nięcie odcinków czasowych sygnału jest realizowane o całkowitą liczbę próbek L . Wówczas odstęp czasowy między kolejnymi bispektrami jest równy $\Delta t_L = L \cdot \Delta t$.

Na podstawie bispektrum jest wyznaczana bikoherencja ze wzoru (Nikias i inni 1993, Yang i inni 2002):

$$b(f_1, f_2) = \frac{|B(f_1, f_2)|^2}{\frac{1}{K^2} \sum_{k=1}^K |X_k(f_1) X_k(f_2)|^2 \cdot \sum_{k=1}^K |X_k(f_1, f_2)|^2} \quad (2)$$

Dla m -tego odcinka czasowego sygnału, na podstawie wzoru (2) wyznaczana jest bikoherencja krótkoczasowa $b(f_1, f_2)$, której przyporządkowano chwilę czasu t_m odpowiadającą środkowi odcinka czasowego i oznaczono $b(m, f_1, f_2)$.

Bispektrum i bikoherencja charakteryzują się redundancją informacji. Główny obszar zapewniający pełny opis bispektrum na płaszczyźnie (f_1, f_2) jest określony przez nierówności (Nikias i inni 1993, Yang i inni 2002):

$$f_2 \leq f_1; \quad f_1 < \frac{f_s}{2}; \quad f_2 < \frac{f_s}{2}; \quad f_1 + f_2 < \frac{f_s}{2}, \quad (3)$$

gdzie f_s - częstotliwość próbkowania sygnału.

Na płaszczyźnie (f_1, f_2) nierówności (3) tworzą trójkąt nazywany trójkątem podstawowym („primary region”). W dalszej części badań sumy modułów bispektrum i bikoherencji krótkoczasowych są obliczane z zastosowaniem składowych ograniczonych na płaszczyźnie (f_1, f_2) trójkątem podstawowym.

Ciąg wartości sum modułów bispektrów krótkoczasowych

Metoda diagnozowania łożysk tocznych jest oparta na powyżej zaproponowanym ciągu wartości sum składowych bispektrów lub bikoherencji wyznaczanych dla kolejnych krótkich odcinków czasowych sygnału drgań. Ciąg wartości sum modułów składowych bispektrów krótkoczasowych zdefiniowano wzorem:

$$B_t(m) = \frac{1}{S} \sum_{f_1} \sum_{f_2} |B(m, f_1, f_2)|, \quad (4)$$

gdzie S - liczba składowych w obrębie trójkąta podstawowego na płaszczyźnie (f_1, f_2) .

Analogicznie do ciągów wartości cech bispektrum krótkoczasowych zdefiniowano ciąg wartości sum składowych bikoherencji krótkoczasowych $b_t(m)$.

Ocena stanu łożysk na podstawie ciągu wartości sum składowych bispektrów

Modele generacji drgań wywołanych punktowymi uszkodzeniami łożysk tocznych zakładają, że w sygnale drgań okresowo powtarzają się zaburzenia wywołane uszkodzeniem (McFadden, Smith 1984). Przyjęto założenia, że ciągi B_t i b_t charakteryzują się okresowością, niosącą informację o uszkodzeniu łożyska. W przypadku punktowego uszkodzenia

łożyska tocznego w widmie ciągu sum składowych bispektrum (bikoherencji) dużą wartość powinna osiągnąć składowa o częstotliwości przechodzenia elementu tocznego przez uszkodzenie, nazywana częstotliwością charakterystyczną uszkodzenia łożyska.

Identyfikację uszkodzeń łożysk przeprowadzono na podstawie widma mocy ciągu sum składowych bispektrow (bikoherencji) krótkoczasowych. Uwzględniając model płaski łożyska tocznego częstotliwości charakterystyczne dla punktowego uszkodzenia poszczególnych elementów łożyska wyznaczano z powszechnie stosowanych wzorów (McFadden, Smith 1984):

uszkodzenie bieżni zewnętrznej

$$f_{bz} = f_0 \frac{n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right), \quad (5)$$

uszkodzenie bieżni wewnętrznej

$$f_{bw} = f_0 \frac{n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right), \quad (6)$$

uszkodzenie elementu tocznego

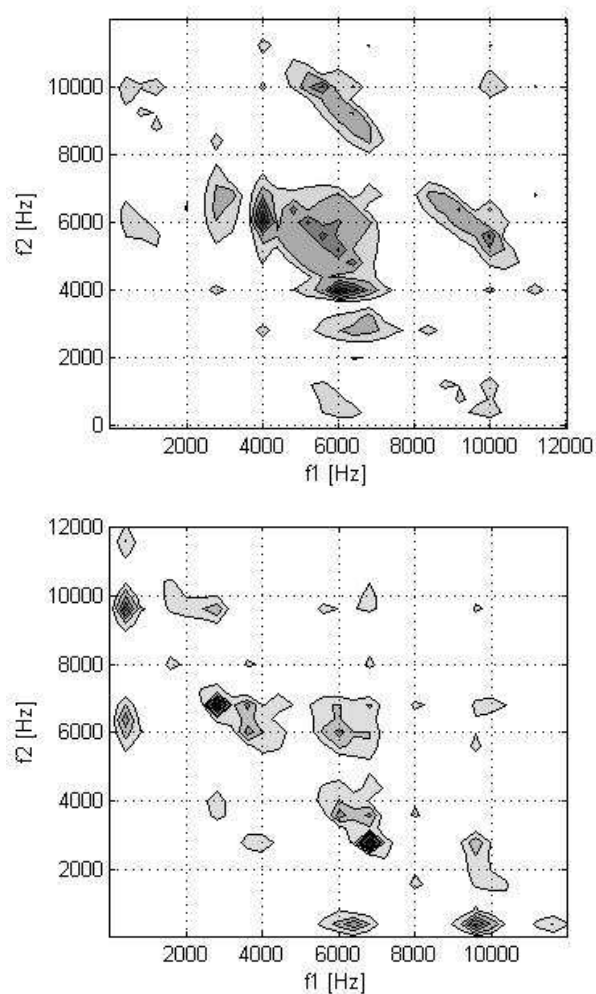
$$f_t = f_0 \frac{D}{d} \left[\left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right], \quad (7)$$

gdzie: d - średnica elementu tocznego, D - średnica podziałowa łożyska, α - kąt działania łożyska, n - liczba elementów tocznych, f_0 - częstotliwość obrotowa łożyska.

Przykład ilustrujący identyfikację uszkodzenia łożyska z zastosowaniem ciągu B_t

Sposób diagnozowania z zastosowaniem opracowanego algorytmu wykorzystującego ciąg sum modułów składowych bispektrow krótkoczasowych przedstawiono na przykładzie identyfikacji punktowego uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska. Analizie poddano sygnał przyspieszeń drgań zarejestrowany na obudowie łożyska w kierunku promieniowym. Częstotliwość charakterystyczna uszkodzenia pierścienia zewnętrznego badanego łożyska, wyznaczona na podstawie wzoru (5) jest równa 190 Hz.

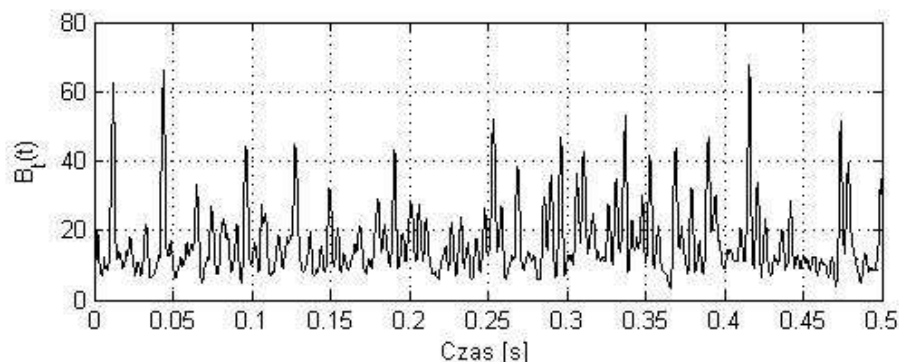
Sygnał podzielono na krótkie odcinki czasowe o długości 2,5 ms. Na rysunku 1 przedstawiono dwa przykładowe bispektra krótkoczasowe wyznaczone dla dwóch różnych odcinków czasowych sygnału. Widać wyraźne różnice między bispektrami krótkoczasowymi wyznaczanymi dla różnych chwil czasu.



Rys. 1. Przykładowe bispektra krótkoczasowe wyznaczone dla dwóch różnych krótkich odcinków czasowych sygnału

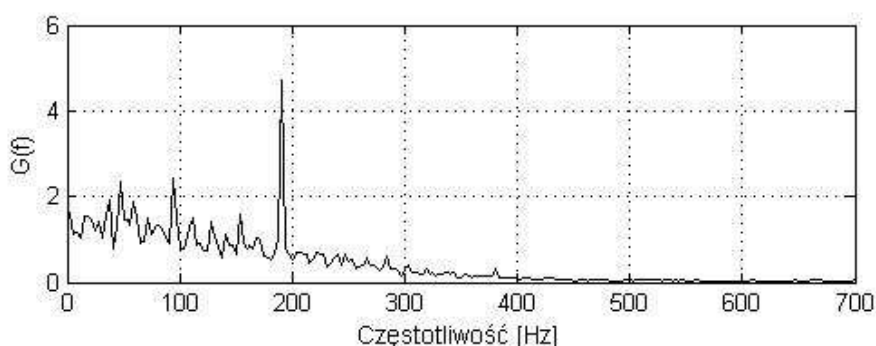
Źródło: opracowania własne

W wyniku analizy sygnału utworzono ciąg wartości sum modułów bispektrów B_t obliczanych dla kolejnych odcinków czasowych sygnału, którego fragment pokazano na rysunku 2. W celu identyfikacji symptomów diagnostycznych wyznaczono widmo mocy ciągu B_t , które przedstawiono na rysunku 3. Widmo ciągu B_t charakteryzuje się wyraźnym symptomem uszkodzenia łożyska w postaci dominującej składowej o częstotliwości 190 Hz, równej częstotliwości charakterystycznej uszkodzenia pierścienia zewnętrznego łożyska.



Rys. 2. Fragment ciągu wartości sum modułów bispektrów krótkoczasowych B_t

Źródło: opracowania własne



Rys. 3. Widmo ciągu wartości sum modułów bispektrów krótkoczasowych B_t

Źródło: opracowania własne

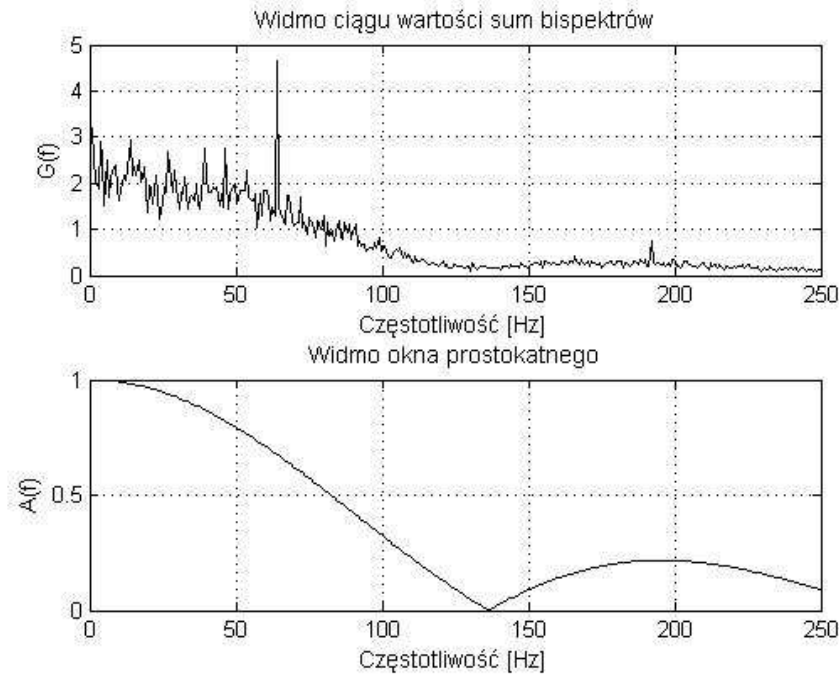
Wpływ parametrów analizy sygnału

Podstawowym parametrem prowadzonych analiz jest długość odcinka czasowego sygnału T_p stosowanego do wyznaczania kolejnych bispektrów krótkoczasowych. Powinien on odpowiadać przedziałowi czasu, w którym impuls wymuszenia, wywołany uszkodzeniem łożyska, znacząco zmienia strukturę częstotliwościową sygnału drgań.

Zakres częstotliwościowy analizy widmowej ciągu wartości cechy powinien obejmować częstotliwości charakterystyczne dla uszkodzenia łożyska i ich harmoniczne. Najczęściej jest to zakres częstotliwości do kilkuset herców. Zakres częstotliwościowy analizy widmowej określa odstęp czasowy między kolejnymi wartościami ciągu B_t . Zakres częstotliwościowy f_{\max} widma ciągu B_t można wyznaczyć ze wzoru:

$$f_{\max} = f_s / (2 \cdot L) \quad (9)$$

gdzie: f_s - częstotliwość próbkowania sygnału, L - przesunięcie kolejnych odcinków czasowego sygnału, o całkowitą liczbę próbek, dla których wyznaczane są kolejne bispektra krótkoczasowe.



Rys. 4. Wpływ długości okna czasowego na wyniki analizy częstotliwościowej ciągu: $G(f)$ - widmo ciągu wartości cechy, $A(f)$ - widmo okna prostokątnego o długości $T_p = 7,2$ ms

Źródło: opracowania własne

Jednak decydujący wpływ na ograniczenie możliwego do wykorzystania pasma częstotliwościowego wyników analiz widmowych ciągu B_t ma długość odcinka czasowego sygnału T_p , który jest stosowany w pierwszym etapie analiz do wyznaczania bispektrów krótkoczasowych. Sytuacja jest analogiczna do układów uśredniających detektorów, na przykład wartości średniej, w których dochodzi do filtracji dolnoprzepustowej wyznaczonej wartości (Randall 1987). Otrzymywane zniekształcone widmo można opisać, jako wyniki iloczynu skalarnego widma ciągu B_t z widmem okna prostokątnego $A(f)$ o długości T_p . Na górze rysunku 4 przedstawiono widmo ciągu B_t utworzonego na podstawie bispektrów krótkoczasowych wyznaczonych z zastosowaniem odcinka czasowego sygnału o długości $T_p = 7,2$ ms. Widmo amplitudowe okna prostokątnego o długości $T_p = 7,2$ ms, będące wynikiem ciągłej transformacji Fouriera pokazano na dole rysunku 4. W przedstawionym przykładzie możliwy do wykorzystania zakres częstotliwościowy wyników analizy praktycznie został ograniczony do częstotliwości około 100 Hz.

Podsumowując, duży wpływ na uzyskane wyniki ma długość odcinka czasowego sygnału, które jest stosowane w pierwszym etapie analiz do tworzenia reprezentacji częstotliwościowej sygnału. Odcinek czasowy sygnału nie powinien być zbyt długi, ponieważ ogranicza pasmo częstotliwościowe tworzonego ciągu. Na podstawie przeprowadzonych badań oceniono, że odcinki czasowe sygnału stosowane do wyznaczania bispektrów krótkoczasowych powinny mieć długość od 1 do 3 milisekund.

Przykłady zastosowania opracowanej metody diagnozowania łożysk

Poniżej przedstawiono przykłady oceny stanu łożysk tocznych z zastosowaniem ciągów sum składowych bispektrów i bikoherencji krótkoczasowych. Wykorzystano sześć sygnałów drgań łożysk tocznych zarejestrowanych na stanowisku do wibroakustycznych badań łożysk. Dwa łożyska toczne firmy ZKL z punktowymi uszkodzeniami pierścienia zewnętrznego i wewnętrznego osadzano w żeliwnej, dzielonej obudowie. Podczas badań sygnały przyspieszeń drgań na obudowie łożyska w kierunku promieniowym zarejestrowano z częstotliwością próbkowania równą 51,2 kHz.

Na stanowisku wprowadzano dodatkowe zakłócenia drganiowe o charakterze szerokopasmowym, których intensywność była regulowana. Sygnały zarejestrowano w warunkach bez dodatkowych zakłóceń i dla dwóch wartości (intensywności) dodatkowych zakłóceń, nazwanych zakłóceniami średnimi i zakłóceniami dużymi. W przypadku wprowadzenia zakłóceń średnich wartość RMS sygnału wzrosła o około 100%, a zakłóceń dużych o 150%.

Symptodem uszkodzenia łożyska jest odpowiednio duża wartość składowej charakterystycznej uszkodzenia łożyska w stosunku do otaczających ją składowych widma mocy ciągu wartości sum bispektrów (bikoherencji). W dalszej części badań dla składowej charakterystycznej widma jest wyznaczana wartość liczby SU (Symptomu Uszkodzenia) wyrażona w decybelach, będąca stosunkiem wartości prążka charakterystycznego do średniej wartości otaczających go prążków, zawartych w paśmie częstotliwościowym o szerokości połowy tercji. Liczba SU umożliwia ilościowe porównywanie uzyskanych symptomów uszkodzenia łożyska dla kilku widm mocy ciągu wartości sum bispektrów (bikoherencji).

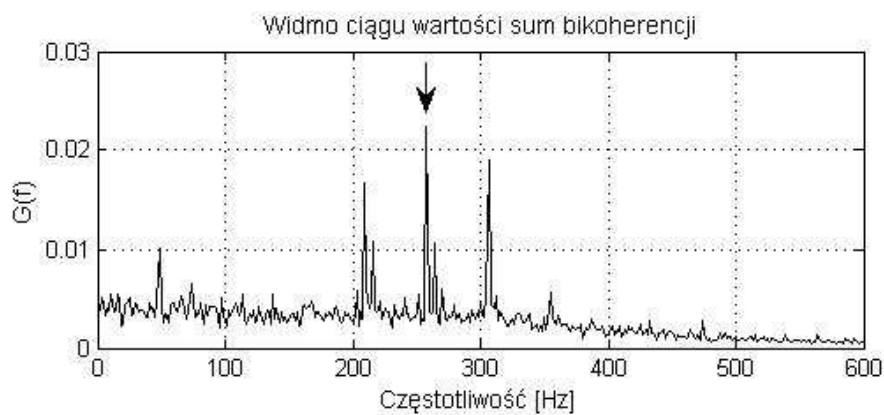
Tabela 1. Przykład wyników analiz - uszkodzenie pierścienia zewnętrznego

Sygnał	RMS, [m/s ²]	Kurtoza	Liczba SU [dB]		
			Ciągu sum składowych bispektrów B_t	Ciągu sum składowych bikoherencji b_t	Widmo obwiedni sygnału drgań
Bez zakłóceń	10,28	4,61	10,57	10,21	11,31
Zakłócenia średnie	18,46	4,30	8,47	9,07	9,77
Zakłócenia duże	22,14	3,71	6,50	6,14	6,44

Źródło: opracowania własne

Przykład otrzymanych wyników dla łożyska z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym przedstawiono w tabeli 1. W przypadku wibroakustycznych metod diagnozowania łożysk tocznych zakłócenia wibroakustyczne mają duży, niekorzystny wpływ na symptomy uszkodzenia łożyska. Porównano wyniki analiz sygnałów drgań uszkodzonego łożyska zarejestrowanych bez zakłóceń oraz z zakłóceniami wibroakustycznymi wprowadzonymi na stanowisku badawczym. Dodatkowe zakłócenia wprowadzone na stanowisku spowodowały duży wzrost wartości RMS, od 10,28 m/s² dla sygnału bez dodatkowych zakłóceń do 22,14 m/s² dla sygnału z dużymi zakłóceniami. Wprowadzone zakłócenia wibroaku-

styczne spowodowały spadek kurtozy do wartości 3,71 co świadczy o tym, że zakłócenia istotnie utrudniają diagnozowanie. Tabela 1 przedstawia wartości liczby SU uzyskane w przypadku analizy sygnałów drgań łożyska z uszkodzonym pierścieniem zewnętrznym dla ciągów sum składowych bispektrów i bikoherencji krótkoczasowych. We wszystkich przypadkach symptom uszkodzenia łożyska, czyli wartość liczby SU jest odpowiednio duża, co oznacza, że składowa charakterystyczna uszkodzenia łożyska jest wyraźnie większa od otaczających ją składowych widma. Dodatkowe zakłócenia wibroakustyczne spowodowały znaczące zmniejszenie wartości składowej charakterystycznej uszkodzenia łożyska. W przypadku widm ciągów sum składowych bispektrów B_t dodatkowe zakłócenia wprowadzone na stanowisku badawczym spowodowały spadek wartości liczby SU z 10,57 dB do 6,50 dB.



Rys. 5. Przykład widma ciągu wartości sum składowych bikoherencji krótkoczasowych b_t w przypadku łożyska z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym

Źródło: opracowania własne

Tabela 2. Przykład wyników analiz - uszkodzenie pierścienia wewnętrznego

Sygnał	RMS, [m/s ²]	Kurtoza	Liczba SU [dB]		
			Ciągu sum składowych bispektrów B_t	Ciągu sum składowych bikoherencji b_t	Widmo obwiedni sygnału drgań
Bez zakłóceń	13,42	6,92	9,54	10,11	10,23
Zakłócenia średnie	17,69	4,94	8,73	9,38	9,12
Zakłócenia duże	20,79	4,19	7,67	7,95	7,69

Źródło: opracowania własne

Widmo ciągu wartości sum składowych bikoherencji krótkoczasowych b_t sygnału zarejestrowanego bez dodatkowych zakłóceń dla łożyska z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym przedstawiono na rysunku 5. Niesprawność łożyska zidentyfikowano na

podstawie składowej widma o częstotliwości charakterystycznej uszkodzenia, równej 256,2 Hz. W przypadku uszkodzeń pierścienia wewnętrznego sygnał jest dodatkowo modulowany amplitudowo składowymi o częstotliwości wirowania wału (w analizowanym przypadku częstotliwość wirowania wału jest równa 47,9 Hz). Jest to wywołane okresową zmianą położenia uszkodzenia punktowego bieżni w stosunku do rozkładu obciążenia promieniowego elementów w łożysku, opisanego teorią Lundberga-Palmgrema. Na rysunku 5 dodatkowa modulacja amplitudowa objawia się w widmie wstęgami bocznymi wokół składowej charakterystycznej uszkodzenia łożyska, rozmieszczonymi w odległości 47,9 Hz.

Tabela 2 przedstawia wartości liczby SU uzyskane w przypadku analizy sygnałów drgań łożyska z uszkodzonym pierścieniem wewnętrznym dla ciągów sum składowych bispektrów i bikoherencji krótkoczasowych. Podobnie jak w poprzednim przykładzie pomimo niekorzystnego wpływu zakłóceń wibroakustycznych obecnych podczas rejestracji sygnałów otrzymano wyraźne symptomy uszkodzenia łożyska, czyli odpowiednio duże wartości liczby SU.

Dodatkowo, w tablicach 1 i 2, wyniki otrzymane z zastosowaniem opracowanej metody diagnozowania łożysk tocznych porównano z wynikami analizy widmowej obwiedni sygnału, która jest powszechnie wykorzystywana w diagnostyce łożysk tocznych. Podczas analizy sygnałów charakteryzujących się dużymi zakłóceniami wibroakustycznymi obydwie metody diagnozowania dawały porównywalne wyniki.

Podsumowanie

W artykule zdefiniowano ciągi wartości sum modułów składowych bispektrów i bikoherencji krótkoczasowych oraz opisano sposób ich wyznaczania. Uzyskane wyniki analiz sygnałów drgań dla typowych uszkodzeń punktowych łożysk tocznych potwierdziły, że zastosowanie ciągów wartości sum składowych bispektrów (bikoherencji) umożliwia identyfikację uszkodzeń łożysk, również w przypadku sygnałów charakteryzujących się dużym poziomem zakłóceń wibroakustycznych. Podobnie jak w przypadku innych wibroakustycznych metod diagnozowania łożysk tocznych wraz ze wzrostem zakłóceń wibroakustycznych efektywność opracowanej metody diagnozowania malała.

W przypadku badań diagnostycznych łożysk tocznych efektywność poszczególnych metod diagnozowania zależy od wielkości uszkodzenia, zakłóceń wibroakustycznych, warunków działania łożyska oraz funkcji przejścia między źródłem drgań a czujnikiem. Powoduje to, że badania wibroakustyczne łożysk tocznych są najczęściej prowadzone z zastosowaniem kilku metod diagnozowania, z użyciem różnych analiz sygnału. Zaproponowana metoda diagnozowania łożysk tocznych może stanowić uzupełnienie najczęściej stosowanych metod, szczególnie w przypadku analizy sygnałów charakteryzujących się dużymi zakłóceniami wibroakustycznymi o charakterze szerokopasmowym. Podobnie jak w przypadku większości wibroakustycznych metod diagnozowania łożysk tocznych, śledząc rozwój uszkodzenia łożyska w funkcji czasu eksploatacji, należy porównywać wyniki badań otrzymane z wykorzystaniem tych samych wartości parametrów analiz sygnałów, takich jak częstotliwość próbkowania sygnału, długość i typ okna czasowego.

Ograniczeniem zaproponowanej metody diagnozowania jest duży wpływ na uzyskane wyniki długości odcinka czasowego sygnału, który jest stosowany w pierwszym etapie analiz do tworzenia bispektrów krótkoczasowych. Długość odcinka czasowego ma wpływ na pasmo częstotliwościowe tworzonego ciągu wartości cech, znacznie ograniczając zakres częstotliwościowy prowadzonych analiz. Na podstawie dotychczasowych badań oceniono, że w przypadku średniej wielkości łożysk tocznych, obracających się z prędkością do kilku tysięcy obrotów na minutę, odcinki czasowe sygnału stosowane do wyznaczania bispektrów powinny mieć długość od 1 do 3 milisekund.

W przypadku bispektrów i bikoherencji krótkoczasowych, wyznaczanych na podstawie krótkich przedziałów sygnału przeprowadzone analizy zachowują zalety analiz widmowych wyższych rzędów, głównie własności redukcji addytywnego szumu gaussowskiego. Zaproponowany w artykule sposób diagnozowania nie wymaga wyznaczenia bispektrum o dużej rozdzielczości częstotliwościowej analizy dla długich odcinków czasowych sygnału. Powoduje to, że metoda jest mniej czuła na zakłócenia sygnału i efekty wynikające z poślizgu elementów tocznych łożyska podczas jego działania.

Literatura

1. Guangming D., Jin Ch. Fagang Z., *A frequency-shifted bispectrum for rolling element bearing diagnosis*, Journal of Sound and Vibration 2015, vol. 339, 396-418.
2. McFadden P. D., Smith J. D., *Model for the Vibration Produced by a Single Point Defect in a Rolling Element Bearing*, Journal of Sound and Vibration 1984; vol 96(1), 69-82.
3. Nikias C. L., Petropulu A. P., *Higher-Order Spectra Analysis*, Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, 1993.
4. Parker B., Ware H., Wipf D., Tompkins W., Clark B., Larson E., Poor H., *Fault diagnostics using statistical change detection in the bispectral domain*, Mechanical Systems and Signal Processing 2000; vol. 14(4), 561-570.
5. Pineyro J., Klempnow A., Lescano V., *Effectiveness of new spectral tools in the anomaly detection of rolling element bearings*, Journal of Alloys and Compounds 2000; 310: 276-279.
6. Radkowski S., *Wibroakustyczna diagnostyka uszkodzeń niskoenergetycznych*, Biblioteka Problemów Eksploatacji, Warszawa-Radom 2002.
7. Randall R. B., *Frequency analysis*, Nearum: Bruel & Kjar, 1987.
8. Randall R. B., Antoni J., *Rolling element bearing diagnostics, a tutorial*, Mechanical Systems and Signal Processing 2011, vol. 25, 485-520.
9. Stack J. R., Harley R. G., Habetler T. G., *An amplitude modulation detector for fault diagnosis in rolling element bearings*, IEEE Trans. Ind. Electron. 2004; 51(5), 1097-1102.
10. Tandon N., Choudhury A., *A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings*, Tribology International 1999; 32: 469-480.
11. Wysogład B., *Application of entropy-based analysis of signals to identification of rolling element bearings faults*, Diagnostyka 2009, vol. 51, p. 65-68.
12. XiangT., James X.G., Gaballa I., Fengshou G., Ball A.D., *A robust detector for rolling element bearing condition monitoring based on the modulation signal bispectrum and its*

- performance evaluation against the Kurtogram*, Mechanical Systems and Signal Processing 2018, vol. 100, 167-187.
13. Yang D., Stronach A., MacConnell P., Penman J., *Third-order spectral techniques for the diagnosis of motor bearing condition using artificial neural networks*, Mechanical Systems and Signal Processing 2002; 16: 391-411.
 14. Yiakopoulos C., Antoniadis I., *Cyclic bispectrum patterns of defective rolling element bearing vibration response*, Engineering Research 2006; 70(2), 90-104.
 15. Zhou Y., Chen J., Dong G.M., Xiao W.B., Wang Z.Y., *Application of the horizontal slice of cyclic bispectrum in rolling element bearings diagnosis*, Mechanical Systems and Signal Processing 2012, vol. 26, no. 1, 229-243.

Dane kontaktowe

bogwysoglad@gmail.com