

Paweł Rzeszuciński, Maciej Orman, Cajetan T. Pinto, Karthik Krishnamoorthi
ABB, Kraków

WYKRYWANIE USZKODZEŃ ŁOŻYSK TOCZNYCH Z WYKORZYSTANIEM SYGNAŁÓW AKUSTYCZNYCH REJESTROWANYCH TELEFONEM KOMÓRKOWYM

DETECTION OF ROLLING ELEMENT BEARING FAULTS BY MEANS OF ACOUSTIC SIGNALS RECORDED BY A MOBILE PHONE

Streszczenie: Według statystyk traktujących o najczęstszych przyczynach awarii silników elektrycznych, łożyska toczne są najczęstszą przyczyną problemów. Jednocześnie dziedzina monitorowania stanu łożysk tocznych jest bardzo dojrzałą gałęzią dużo szerszego zagadnienia diagnostyki maszyn wirujących. W rezultacie wiele bardzo wydajnych systemów diagnostycznych pozwalających na monitorowanie stanu łożysk z bardzo dużą dokładnością zostało stworzonych w ostatnich dekadach. Niestety inwestycja w owe, często kosztowne systemy, nie zawsze jest ekonomicznie opłacalna, zwłaszcza gdy rozpatrywany jest monitoring nie krytycznych elementów systemu. To z kolei może prowadzić do potencjalnego zwrotu z inwestycji o krytycznie niskiej wartości. Ten stan rzeczy jest motywatorem działań mających na celu znalezienie idealnej równowagi pomiędzy kosztami przedsięwzięć skierowanych na monitorowanie stanu elementów łożyska, a ich efektywności. Jeden z obecnych trendów jest stricte powiązany z możliwościami bardzo wszechstronnych urządzeń przenośnych, na przykład telefonów komórkowych, które są wyposażone w mocne jednostki obliczeniowe oraz mają domyślnie wbudowanych wiele rodzajów sensorów. Ten tekst koncentruje się na możliwościach wykorzystania mikrofonu wbudowanego w standardowy telefon komórkowy do monitorowania stanu łożysk tocznych. Okazuje się, że głównym wyzwaniem jest charakterystyczna odpowiedź częstotliwościowa standardowego mikrofonu, który jest skonstruowany z myślą o transmisji ludzkiego głosu, a ten rzadko niesie ważne informacje w paśmie poniżej 200Hz. Jednakże uzyskane wyniki wskazują, że pomimo tego ograniczenia, jest możliwe wykrywanie obecności wad typowych dla łożysk tocznych.

Abstract: According to statistics of the causes of electric machinery failures, bearings are at the very top of the list. Simultaneously the field of condition monitoring of rolling element bearings is a very mature branch of the more broad family of rotating machinery diagnostics. Many sophisticated systems have evolved over the past decades which allow to monitor the condition of bearings with a very high accuracy. Unfortunately, the business case of installing such, often costly system, is not always economically viable, especially when monitoring of the non-critical elements of the system is concerned and so the potential Return On Investment might be of critically low value. For this reason there is an ongoing endeavor to find the perfect balance between the cost of the condition monitoring activities and their efficiency. One of the mostly investigated areas these days is related to the onset of the very powerful and versatile portable devices e.g. mobile phones which come instrumented with a very powerful CPUs and a number of sensors of different types. This text looks into the possibilities of utilizing the microphone embedded in a standard off-the-shelf mobile phone for the purpose of monitoring the condition of rolling element bearings. It turns out that the main challenge comes from the characteristic frequency response of the standard microphone which is mainly designed to transmit human voice, typically in the range above 200Hz. However the obtained results suggest that despite this limitation it is possible to detect the presence of typical faults in the rolling element bearings.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, diagnostyka łożysk, sygnał akustyczny, telefon komórkowy*
Keywords: *electrical machines, bearing diagnostics, acoustic signal, mobile phone*

1. Wstęp

Diagnostyka łożysk stanowi bardzo ważny element każdego planu monitorowania kondycji maszyn i układów wirujących. Z racji na krytyczną rolę jaką łożyska spełniają w każdej maszynie wirującej, powstało wiele metod pozwalających na wiarygodne oszacowanie stanu tych elementów. Historycznie diagnostyka była

oparta o doświadczenie załogi utrzymania ruchu, które w dużej mierze bazowało na kojarzeniu doznań słuchowych z odpowiednimi stanami pracy. Wraz z postępem technologii, zadanie monitorowania kondycji maszyn stawało się coraz większym udziałem różnego rodzaju sensorów elektronicznych i układów diagno-

stycznych opartych o np. sygnały wibracji [1], emisji akustycznej [2], analizy prądów w silnikach [3], termografii [4], czy analizy zawiesin oleju [5]. Każde z wymienionych sposobów ma swoje wady i zalety, niemal każdy prowadzi do bardzo wiarygodnych wyników diagnostycznych, ale wszystkie mają jedną wspólną cechę przekreślającą ich przydatność w pewnych zastosowaniach - wysoką cenę. Dla większości zastosowań system diagnostyczny stanowi niewielką cenę w porównaniu z potencjalnymi wydatkami, jakie ich poprawne działanie może zaoszczędzić. Jednak pewna część działań diagnostycznych nakierowana jest na monitorowanie stanu elementów nie mających krytycznego (co nie oznacza, że nieważnego) znaczenia dla funkcjonowania większego układu. W takiej sytuacji szuka się metod mogących dostarczyć pewnych, niekoniecznie bardzo szczegółowych i szybko wykrywanych, symptomów uszkodzenia tego rodzaju maszyn. Jednocześnie wraz z nadejściem przenośnych urządzeń, jak np. nowoczesnych telefonów komórkowych czy tabletów, przemysł wszedł w posiadanie systemów o bardzo mocnych jednostkach obliczeniowych oraz wyposażonych w wiele sensorów dobrej jakości. Systemy te, dostępne niemalże dla każdego mogą niebawem stać się przenośnymi systemami diagnostycznymi tzw. pierwszego kontaktu. Niniejsza praca przedstawia analizy wyników pomiarów mających na celu sprawdzenie możliwości zastosowania sygnałów akustycznych nagrywanych standardowym telefonem komórkowym do diagnostyki stanu łożysk tocznych niskonapięciowych silników indukcyjnych. Charakterystyka wbudowanych mikrofonów telefonu wymusiła użycie specjalnych technik przetwarzania sygnałów tj. kurtozy spektralnej oraz transformaty Hilberta, aby uwidocznili obecność symptomów charakterystycznych dla uszkodzeń łożysk w sygnale akustycznym. Rezultaty sugerują, iż jest możliwym diagnozowanie uszkodzeń łożysk tocznych na podstawie sygnałów akustycznych rejestrowanych standardowym telefonem komórkowym.

2. Rodzaje uszkodzeń łożysk tocznych

Uszkodzenie łożyska tocznego najczęściej objawia się wystąpieniem jednej z charakterystycznych częstotliwości uszkodzenia, lub ich kombinacji. Częstotliwości te, determinowane parametrami technicznymi łożyska oraz prędkością obrotową wału, na którym łożysko jest osadzone można podzielić na [6]:

- uszkodzenie bieżni zewnętrznej (BPFO – *ang. Ball Pass Frequency Outer*), gdzie uszkodzenie rozwija się na powierzchni bieżni zewnętrznej,
- uszkodzenie bieżni wewnętrznej (BPFI – *ang. Ball Pass Frequency Inner*), w którym struktura bieżni wewnętrznej ulega uszkodzeniu,
- uszkodzenie elementu tocznego (BSF – *ang. Ball Spin Frequency*), gdzie element toczny np. kulka pracując pomiędzy bieżniami - zewnętrzną i wewnętrzną - doznaje uszkodzenia,
- uszkodzenie koszyka (FTF – *ang. Fundamental Train Frequency*), w którym koszyk utrzymujący elementy toczne na odpowiednim miejscu ulega uszkodzeniu.

Stosunkowo często występującym uszkodzeniem jest tzw. 2xBSF dla sytuacji, w której uszkodzenie na elemencie tocznym jest tak usytuowane, że z każdym obrotem wokół własnej osi obszar uszkodzenia wchodzi w interakcję zarówno z bieżnią zewnętrzną, jak i wewnętrzną. Częstotliwość tego uszkodzenia jest dwukrotnością BSF.

Ze względu na ograniczenia edytorskie niniejszej pracy, przedstawione wyniki badań zostały zawężone do wyników analizy jednego przypadku. W zaprezentowanym przykładzie zostało zdiagnozowane uszkodzenie zarówno typu BPFO oraz jak i BSF. Równanie (1) oraz (2) przedstawiają sposób wyznaczania obu tych częstotliwości uszkodzenia [6]:

$$BPFO = \frac{N}{120} \cdot N_b \left(1 - \frac{Bd \cos \alpha}{Pd} \right) \quad (1)$$

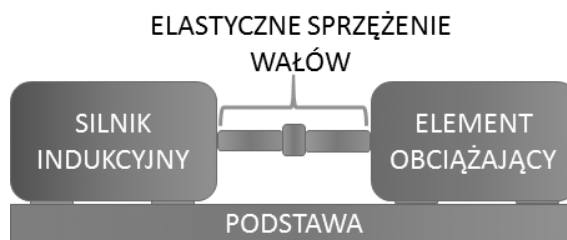
$$BSF = \frac{N}{120} \cdot \frac{P_d}{B_d} \left(1 - \frac{Bd^2}{Pd^2} \cdot \cos^2 \alpha \right) \quad (2)$$

gdzie N to prędkość obrotowa bieżni wewnętrznej łożyska (w RPM), N_b oznacza ilość elementów tocznych, B_d oznacza średnicę elementu tocznego, P_d oznacza odległość między przeciwległymi elementami tocznymi w łożysku oraz α oznacza kąt działania łożyska.

3. Układ pomiarowy oraz warunki akwizycji danych

Poglądowy schemat układów napędowych, na bazie których zostały dokonane pomiary, anali-

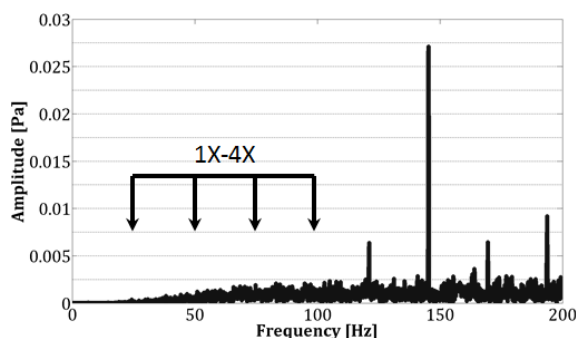
za których jest przedmiotem tej pracy został przedstawiony na Rys. 1. Pomiarów dokonano w cementowni, w której pracowało wiele układów o identycznych parametrach. Układy te składały się z czterobiegunowych silników indukcyjnych o mocy 75kW i prędkości znamionowej 1485RPM (*silnik indukcyjny*) napędzających dmuchawy powietrza (*element obciążający*). Oba elementy były połączone przy pomocy elastycznego sprzęgła (*elastyczne sprzężenie wałów*). Rutynowy przegląd techniczny dużej ilości zestawów doprowadził do wykrycia uszkodzenia bieżni zewnętrznej oraz elementu tocznego po stronie napędowej jednego z silników. Dane przedstawione w tej pracy pochodzą zatem z dwóch silników: referencyjnego z łożyskami bez uszkodzeń, oraz z silnika, w którym wykryto uszkodzenie łożyska. Przedstawione wyniki analizy pochodzą z pomiaru sygnałów dwóch różnych wielkości fizycznych: sygnałów akustycznych dokonanych po stronie napędowej silnika przy użyciu telefonu komórkowego popularnej marki oraz referencyjnych sygnałów wibracyjnych dokonanych standardowym czujnikiem przyspieszenia. Procedura pomiarowa sygnałów akustycznych polegała na trzymaniu telefonu w odległości ok. 10cm od pokrywy silnika po stronie napędowej. Telefon był skierowany mikrofonem w kierunku badanej powierzchni. Częstotliwość próbkowania sygnału wynosiła 44.1kHz, a każdy z pomiarów trwał 10 sekund. Pomiar referencyjne czujnikami wibracji zostały zrealizowane przy użyciu systemu akwizycji danych firmy ABB - MACHsense. Sygnały wibracji były mierzone akcelerometrem CTC AC192 o czułości 100mV/g. Dla ujednoczenia warunków akwizycji danych, sygnał wibracji był rejestrowany również przez 10 sekund przy częstotliwości próbkowania 44.1kHz. Nominalna częstotliwość uszkodzeń typu BPFO oraz BSF wynosiły odpowiednio 3.564 1/s oraz 4.598 1/s. Dodatkowo w przypadku wystarczająco zaawansowanego uszkodzenia typu BSF, sygnał jest modulowany częstotliwością FTF [7], która dla badanego łożyska wynosiła 0.3960 1/s.



Rys. 1. Poglądowy schemat układów napędowych

4. Sposób przetwarzania sygnałów akustycznych

Analiza widma częstotliwościowego sygnału akustycznego zarejestrowanego telefonem komórkowym bardzo szybko pozwoliła dostrzec mocne ograniczenie zaproponowanej metody – niskie harmoniczne prędkości obrotowej wału (1X-4X) były praktycznie niewidoczne w sygnale, natomiast niektóre z wyższych harmonicznych ($\geq 5X$) były elementami dominującymi sygnału. Fakt ten spowodowany jest charakterystycznym pasmem przenoszenia standardowych mikrofonów telefonów komórkowych, które z natury swej są przeznaczone do przenoszenia informacji zawartych w ludzkim sygnale głosowym i jednocześnie do ograniczania informacji nadmiarowych. Ludzki głos typowo definiowany jest od częstotliwości 200Hz [8], więc informacje poniżej tej częstotliwości są zbędne dla poprawnej komunikacji. To z kolei powoduje, iż prawdopodobnym staje się, że charakterystyczne częstotliwości uszkodzenia łożyska nie będą widoczne w surowym widmie sygnału. Przykładowe widmo sygnału akustycznego zarejestrowanego telefonem zostało przedstawione na Rys. 2.



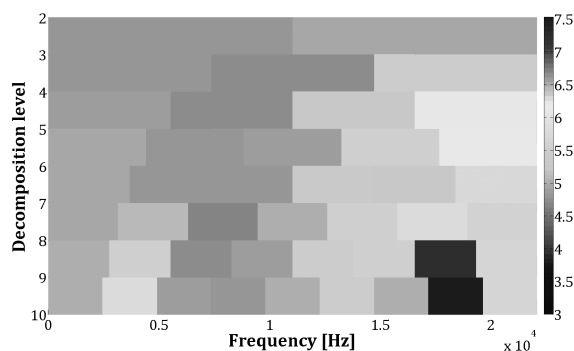
Rys. 2. Typowy przykład widma częstotliwościowego sygnału akustycznego zarejestrowanego telefonem komórkowym

Gdy stan techniczny elementu łożyska tocznego ulega pogorszeniu, często przekłada się to na zniszczenie powierzchni bieżni lub elementów

tocznych w wyniku czego praca tych elementów staje się dużo mniej płynna w porównaniu z pracą łożyska bez uszkodzenia. Gdy element toczny wejdzie w kontakt ze zniszczoną powierzchnią bieżni, lub gdy zniszczoną część elementu tocznego przetacza się przez bieżnię, dochodzi do wystąpienia wibracji o charakterze impulsowym. Impulsy te, pobudzając bardzo szeroki przedział częstotliwości w strukturze systemie, najczęściej pobudza również częstotliwości rezonansowe całej struktury (nie tylko łożyska, ale i innych elementów) [9]. W wyniku powyższych interakcji częstotliwości rezonansowe są modulowane charakterystyczną częstotliwością uszkodzenia (lub kombinacją częstotliwości różnych uszkodzeń). Dlatego jedną z najczęściej stosowanych metod diagnostyki łożysk jest demodulacja amplitudowa sygnału wibracji w okolicach częstotliwości rezonansowych systemu oraz analiza tak przetworzonego sygnału. Naturalnie, wartości częstotliwości rezonansowych nie są podawane w ramach standardowych kart technicznych łożysk, a przez to bardzo rzadko są dostępne jako informacja wejściowa do procesu analizy sygnałów. Jednym ze sposobów zautomatyzowanego znajdowania obszarów częstotliwości sygnału, w których występują zjawiska o naturze impulsowej jest podejście oparte na metodach kurtozy spektralnej oraz transformaty Hilberta. Kurtoza spektralna to narzędzie statystyczne używane do detekcji tych przedziałów częstotliwości sygnału, w którym występuje największa aktywność przebiegów o naturze impulsowej [10]. Technika ta generuje swoistą mapę impulsowości sygnału czyli tzw. kurtogram. Mapa ta jest trójwymiarową charakterystyką natury sygnału, gdzie oś X przedstawia zakres częstotliwości sygnału, oś Y reprezentuje poziom dekompozycji sygnału, a oś Z przedstawia wartość kurtozy sygnału przefiltrowanego w danym przedziale częstotliwości. Typowy przykład kurtogramu został przedstawiony na Rys. 3. Transformata Hilberta z kolei jest standardowym narzędziem do demodulacji amplitudowej sygnału [11].

W niniejszej pracy kurtoza spektralna w połączeniu z transformatą Hilberta zostały użyte do analizy sygnałów akustycznych zarejestrowanych telefonem celem automatycznej determinacji optymalnych zakresów częstotliwościowych przy wykrywaniu oznak uszkodzenia łożysk. Sygnał referencyjny wibracji został pod-

dany takiemu samemu przetwarzaniu. Rezultaty zostały przedstawione w rozdziale 5.



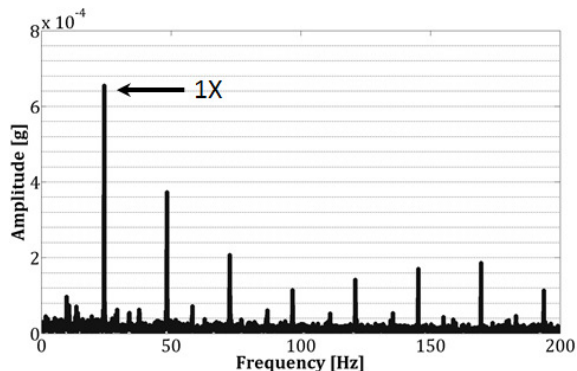
Rys. 3. Typowy przykład kurtogramu sygnału akustycznego zarejestrowanego telefonem komórkowym. Największa impulsowość w sygnale jest widoczna w paśmie 17.1kHz – 18.6kHz

5. Wyniki

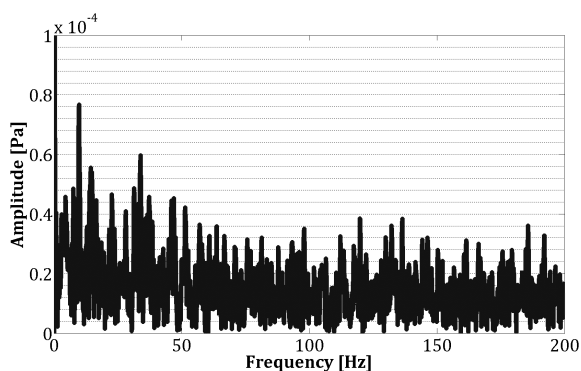
5.1. Łożysko bez uszkodzenia

Widmo obwiedni sygnału referencyjnego zarejestrowanego czujnikiem przyspieszenia dla łożyska bez uszkodzenia po filtracji w przedziale 1.42kHz – 2.71kHz zostało przedstawione na Rys. 4. Ten przedział częstotliwości został wskazany przez kurtozę spektralną jako niosący największe impulsy w sygnale. Przedstawione widmo jest zdominowane przez składową prędkości obrotowej wału (dominujący komponent) oraz szereg harmonicznych tego elementu. Obecność tak dużej ilości jasno wyróżnialnych harmonicznych prędkości obrotowej wału może być wytłumaczone obecnością elastycznego sprzęgła, które zawsze wprowadza pewien stopień niewyosiowania systemu. Dla porównania Rys. 5 przedstawia obwiednię sygnału akustycznego zarejestrowanego telefonem komórkowym dla tego samego łożyska bez uszkodzenia, po filtracji w przedziale 15.43kHz – 16.75kHz, zgodnie ze wskazaniem kurtozy spektralnej. Natura przedstawionego sygnału jest zgoła odmienna w porównaniu z sygnałem wibracyjnym - nie jest już możliwe wyodrębnienie rodziny harmonicznych pochodzących od prędkości obrotowej wału. Fakt ten może być dyktowany obecnością elastycznego sprzęgła, które z jednej strony doprowadza do drgań struktury maszyny (pobudzając sensor przyspieszenia) zarazem nie pracując na tyle głośno, aby wyraźnie promieniować w powietrzu i pobudzać mikrofon telefonu komórkowego. Widmo z Rys. 5 ma charakter szumu i nie niesie ze sobą żadnych informacji diagnostycznych. Warto również zwrócić uwagę, iż prze-

działy częstotliwości dla sygnału akustycznego oraz sygnału wibracji są zgoła inne, co wynika bezpośrednio z różnic natury sygnału przenieszonego strukturą systemu, a sygnału rozchodzącego się w powietrzu.



Rys. 4. Widmo obwiedni sygnału z referencyjnego czujnika przyspieszenia dla łożyska bez uszkodzenia po filtracji w przedziale 1.42kHz – 2.71kHz

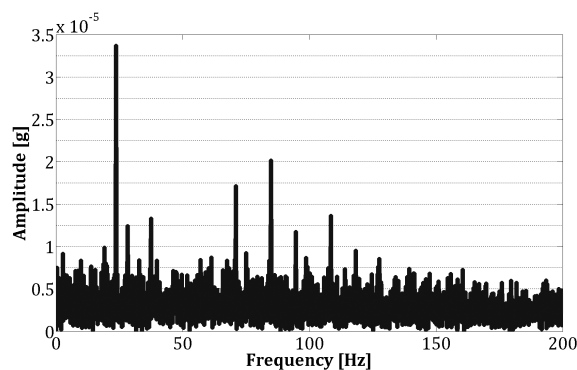


Rys. 5. Widmo obwiedni sygnału akustycznego zarejestrowanego telefonem dla łożyska bez uszkodzenia po filtracji w przedziale 15.43kHz – 16.75kHz

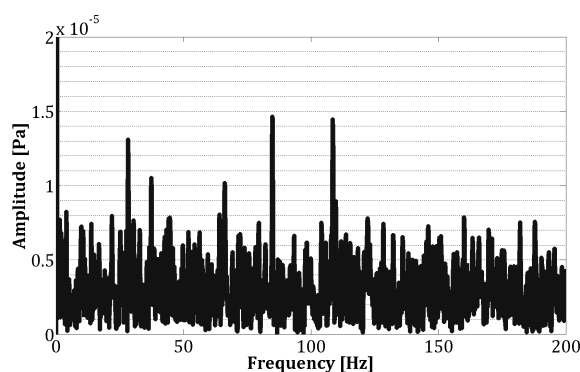
5.2. Łożysko z uszkodzeniem typu BPFO i BSF

Sygnały zebrane z systemu, w którym zostało wykryte uszkodzenie łożyska, charakteryzują się bardzo odmienną naturą w porównaniu z pomiarami z łożyska bez uszkodzenia. Częstotliwości charakterystyczne dla uszkodzenia BPFO oraz BSF mają wartości odpowiednio 86.60Hz ($3.564 \cdot 24.30\text{Hz}$) oraz 111.73Hz ($4.598 \cdot 24.30\text{Hz}$). Rys. 6 oraz Rys. 7 przedstawiają widma sygnału odpowiednio wibracji oraz akustycznego po filtracji w pasmach częstotliwości wskazanych przez kurtozę spektralną osobno dla każdego z sygnałów. W obu przypadkach zarówno częstotliwość BPFO jak i BSF są łatwo dostrzegalne w sygnale. W przypadku sygnału akustycznego zarejestrowanego telefo-

nem (Rys. 7) częstotliwości te są dwoma dominującymi komponentami w sygnale, podczas gdy w referencyjnym sygnale wibracji zarejestrowanym czujnikiem przyspieszenia (Rys. 6), pomimo iż wciąż wyraźnie widoczne, komponenty nie dominują widma. W obu przypadkach widoczny jest również prążek prędkości obrotowej wału. W tym przypadku to sygnał wibracji jest zdominowany tym komponentem, podczas gdy w sygnale akustycznym ta częstotliwość nie odgrywa aż tak wyraźnej roli. Te relacje można ponownie odnieść do tezy z poprzedniej sekcji i wpływu elastycznego sprzęgła na oba rodzaje sygnałów. Jednocześnie nie został zaobserwowany żaden komponent pochodzący od częstotliwości FTF, więc można przypuszczać, iż BSF była w początkowej fazie rozwoju.



Rys. 6. Widmo obwiedni sygnału z referencyjnego czujnika przyspieszenia dla łożyska z uszkodzeniem typu BPFO i BSF po filtracji w przedziale 8.96kHz – 9.72kHz



Rys. 7. Widmo obwiedni sygnału akustycznego zarejestrowanego telefonem dla łożyska z uszkodzeniem typu BPFO i BSF po filtracji w przedziale 19.61kHz – 20.01kHz

6. Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było przedstawienie wyników dochodzenia mającego na celu przebadanie możliwości wykrycia uszkodzenia łożyska

żyska tocznego na bazie analizy sygnałów akustycznych rejestrowanych standardowym telefonem komórkowym. Pomiar przeprowadzono w warunkach przemysłowych na dwóch systemach, z których jeden pracował z silnikiem indukcyjnym o łożyskach bez uszkodzenia, drugi natomiast był systemem wadliwym, z silnikiem o łożysku z uszkodzeniem typu BPFO oraz BSF. Oprócz pomiarów dokonanych telefonem komórkowym, zarejestrowano również referencyjne sygnały wibracji przy użyciu sensorów przyspieszenia. Wstępna analiza danych akustycznych ujawniła ograniczenie metody opartej o pomiary telefonem, wynikające ze specyficznego pasma przenoszenia wbudowanego mikrofonu telefonu komórkowego przystosowanego do efektywnej rejestracji ludzkiego głosu w paśmie częstotliwości od 200Hz wzwyż. Ograniczenie to powoduje, iż charakterystyczne częstotliwości uszkodzenia łożysk mogą być niewidoczne w widmie surowego sygnału. Na bazie powyższych obserwacji zdecydowano się na użycie technik przetwarzania sygnałów dobrze znanych w dziedzinie diagnostyki maszyn opartej na sygnałach wibracyjnych. Kurtoza spektralna w połączeniu z transformatą Hiberna pomagają ustalić pasma częstotliwości sygnału odpowiadające największej impulsowości sygnału w dziedzinie czasu, zwiększając szanse na detekcję impulsów pochodzących od uszkodzonego łożyska. Należy pamiętać, iż naturalnym ograniczeniem stosowania sygnałów akustycznych w diagnostyce maszyn jest podatność na wpływ hałasu elementów pracujących w bliskiej odległości do miejsca pomiaru. Jednak obserwacje pokazały, iż usytuowanie mikrofonu w niedalekiej odległości od badanego elementu pozwala zminimalizować negatywny wpływ tła akustycznego na efektywność pomiarów diagnostycznych. Przedstawione wyniki sugerują, iż jest możliwym diagnozowanie uszkodzeń łożysk tocznych na podstawie sygnałów akustycznych rejestrowanych standardowym telefonem komórkowym.

7. Literatura

- [1]. Randall R.B., Antoni J.: *Rolling element bearing diagnostics—A tutorial*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 25 (2), pp. 485–520, 2011.
- [2]. Morhain A., Mba D.: *Bearing defect diagnosis and acoustic emission*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, Vol. 217 (4), pp. 257-272, 2003.
- [3]. Frosini L., Bassi E.: *Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57 (1), pp. 244 - 251, 2009.
- [4]. Mazioud A., Ibos L., Khlaifi A., Durastanti, J.F.: *Detection of rolling bearing degradation using infrared thermography*, 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Kraków, Poland, 2008.
- [5]. Miller J.L., Kitaljevich D.: *In-line oil debris monitor for aircraft engine condition assessment*, IEEE Aerospace Conference Proceedings, Vol. 6, pp. 49-56, 2000.
- [6]. Sinha J.K.: *Vibration Analysis, Instruments, and Signal Processing*, CRC Press, 2014.
- [7]. Randall R. B.: *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, John Wiley & Sons, 2011
- [8]. Beebe R., Myers J.: *Professional Paramedic, Volume I: Foundations of Paramedic Care*, Cengage Learning, 2012.
- [9]. Goldman S.: *Vibration Spectrum Analysis: A Practical Approach*, Industrial Press Inc, 1999.
- [10]. Antoni J.: The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing non-stationary signals, Mechanical Systems and Signal Processing 20: 282-307, 2006.
- [11]. Randall R.B.: *Frequency analysis*, Bruel & Kjaer 3rd edition, 1987.