

Marcin Pawlak
Politechnika Wroclawska

ZASTOSOWANIE ANALIZY SYGNAŁÓW AKUSTYCZNYCH DO WYKRYWANIA USZKODZEŃ WIRNIKÓW I ŁOŻYSK W SILNIKACH INDUKCYJNYCH

APPLICATION OF ACOUSTIC SIGNAL ANALYSIS TO INDUCTION MOTOR ROTOR AND BEARING FAULTS DETECTION

Abstract: It is known that electrical and mechanical failures appearing in the induction motor cause increased vibration emission of the machine. This phenomenon is commonly used to identify condition of the motor using diagnostic devices equipped with accelerometers. It can be noted that vibration phenomenon is often accompanied by increased noise in the faulty motor, which can be used as a symptom of failure. Contrary to the vibration signals, measurement of acoustic signals does not require installing any sensors in the machine and can be performed non-invasively from a distance. This paper presents the possibility of using the analysis of acoustic signal emitted by the working motor for detection of bearings failures and broken rotor bars. Also the construction details of designed acoustic analyzer, which was utilized in experimental research were presented.

1. Wstęp

Silniki indukcyjne stanowią największą grupę silników elektrycznych stosowanych w rozmaitych układach napędowych. Produkowane są w bardzo szerokim zakresie mocy – od kilku watów do kilku megawatów. Do ich największych zalet można zaliczyć prostą konstrukcję, zwartą budowę, dużą przeciążalność, niską cenę oraz względnie dużą niezawodność. Z tego powodu są najchętniej wykorzystywane do pracy, jako napędy maszyn pracujących w ciężkich warunkach środowiskowych. Statystyki podają, że stanowią one przeszło 90% wszystkich silników elektrycznych zainstalowanych na świecie [2]. Najczęściej występują, jako napędy pojedynczych urządzeń, lecz równie często stanowią zespoły napędowe całych linii produkcyjnych. Pomimo ich wysokiej niezawodności, w trakcie ich eksploatacji mogą wystąpić uszkodzenia w częściach elektrycznych obwodu stojana i wirnika oraz w elementach mechanicznych zarówno samego silnika, jak i maszyny roboczej. Szacuje się, że największą grupę uszkodzeń (40-50%) stanowią uszkodzenia łożysk tocznych. Następnie plasują się uszkodzenia stojana (30-40%), uszkodzenia wirnika (ok. 10%) oraz inne, niesklasyfikowane uszkodzenia (ok. 10%) [2]. W zakładach przemysłowych, a szczególnie w maszynach roboczych tworzących zintegrowany ciąg technologiczny, nagła awaria silnika stanowi poważny problem, gdyż potrafi zatrzymać proces technologiczny na dłuższy czas, generując dla przedsiębiorstwa ogromne straty. Aby temu zapobiec, w najbardziej newralgicz-

nych częściach procesu technologicznego instaluje się specjalistyczną aparaturę diagnostyczną, która na bieżąco monitoruje stan techniczny pracujących maszyn i urządzeń. Najczęściej jednak urządzenia diagnostyczne wymagają zainstalowania odpowiednich czujników pomiarowych w monitorowanych napędach, co powoduje konieczność ingerencji w ich konstrukcję, przez co nie zawsze jest możliwe do zrealizowania. Dlatego też, w ostatnich latach w wielu ośrodkach badawczych na świecie, prowadzone są intensywne badania naukowe, mające na celu znalezienie takich metod diagnostycznych, które pozwolą na skuteczną diagnostykę maszyn w stanie ich normalnej pracy, bez potrzeby rozłączania obwodów zasilających oraz bez konieczności instalowania specjalistycznych czujników pomiarowych.

Niniejszy referat jest odpowiedzią na te potrzeby i przedstawia możliwości zastosowania analizy sygnałów akustycznych emitowanych przez uszkodzony silnik, do wykrywania uszkodzeń łożysk oraz przerwanych prętów klatki wirnika. Przedstawiono również szczegóły konstrukcyjne wykonanego prototypu analizatora akustycznego, który był wykorzystywany w badaniach eksperymentalnych.

2. Wybrane metody wibroakustyczne stosowane w diagnostyce silników indukcyjnych

2.1. Wykrywanie uszkodzeń łożysk

Łożyska toczne utrzymują wirnik maszyny w osi obrotu oraz przenoszą obciążenia, przy zach-

waniu minimalnych oporów toczenia. Stanowią one mechaniczne, ruchome połączenie pomiędzy wirnikiem a korpusem silnika. W przypadku wystąpienia uszkodzeń w łożyskach tocznych mogą pojawić się niepożądane zjawiska, takie jak: zwiększone opory ruchu, a tym samym większy prąd pobierany przez silnik, wzrost temperatury, wzrost amplitudy generowanych drgań oraz wzrost hałasu. Do wykrywania uszkodzeń łożysk powszechnie stosuje się metodę analizy częstotliwościowej sygnału przyspieszenia drgań. Metoda ta pozwala również na klasyfikację rodzaju uszkodzenia, spośród których wyróżnić można następujące przypadki:

- uszkodzenia elementów tocznych,
- uszkodzenia bieżni wewnętrznej,
- uszkodzenia bieżni zewnętrznej,
- uszkodzenia koszyka.

Każdy rodzaj uszkodzenia wywołuje właściwe dla siebie zjawiska wibroakustyczne, polegające na pojawieniu się charakterystycznych składowych częstotliwościowych w widmie przyspieszenia drgań. Ponieważ wibracje korpusu maszyny powodują emisję hałasu, charakterystyczne składowe częstotliwościowe będą występować również w widmie sygnału akustycznego, który może być zarejestrowany za pomocą mikrofonów usytuowanych w pobliżu badanego silnika. Znajomość budowy geometrycznej łożyska oraz wartości prędkości obrotowej silnika pozwala na wyznaczenie charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych, korzystając z poniższych wzorów [1],[2]:

$$f_{bz} = \frac{N_k}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{d \cdot \cos \vartheta}{D}\right) \quad (1)$$

$$f_{bw} = \frac{N_k}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{d \cdot \cos \vartheta}{D}\right) \quad (2)$$

$$f_k = \frac{D}{2 \cdot d} \cdot f_r \cdot \left(1 - \left(\frac{d \cdot \cos \vartheta}{D}\right)^2\right) \quad (3)$$

$$f_{ko} = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{d \cdot \cos \vartheta}{D}\right) \quad (4)$$

$$f_r = \frac{n}{60} \quad (5)$$

gdzie: f_r – częstotliwość obrotowa, f_{bz} – częstotliwość związana z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej, f_{bw} – częstotliwość związana z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej, f_k – częstotliwość związana z uszkodzeniem elementu tocznego, f_{ko} – częstotliwość związana z luzami

i uszkodzeniem koszyka, n – prędkość obrotowa wirnika, d – średnica elementu tocznego, D – średnica podziałowa łożyska, ϑ – kąt pracy łożyska (0° dla łożyska kulkowego zwykłego), N_k – liczba elementów tocznych łożyska.

Na podstawie powyższych częstotliwości charakterystycznych wylicza się częstotliwości uszkodzeniowe oraz ich krotności:

$$f_u = f_r \pm k \cdot f_l \quad (6)$$

gdzie: $k = 1, 2, 3, \dots$, f_u – częstotliwość drgań związana z danym uszkodzeniem łożyska, f_l – częstotliwość charakterystyczna łożyska.

2.2. Wykrywanie uszkodzeń wirnika

Do najczęstszych uszkodzeń wirników zalicza się przerwane pręty klatek oraz pęknięte pierścienie zwierające. Uszkodzenia prętów wirnika należą do magnetycznych źródeł procesów wibroakustycznych w maszynie elektrycznej. Silnik indukcyjny jest maszyną, w której następuje zamiana energii elektrycznej na energię mechaniczną. Wytwarzanie momentu napędowego w SI polega na wykorzystaniu sił w szczelinie powietrznej między wirnikiem a stojanem pochodzących od ich obwodów magnetycznych. Siła radialna w szczelinie powietrznej jest funkcją czasu. Siła ta ma składowe o następujących częstotliwościach:

- podwojonej częstotliwości sieciowej $2f_s$,
- częstotliwości zależnej od prędkości obrotowej i liczby par biegunów pf_r oraz jej drugiej harmonicznej $2pf_r$,
- częstotliwości sumacyjno-różnicowych: $2f_s \pm pf_r$ oraz $2f_s \pm 2pf_r$.

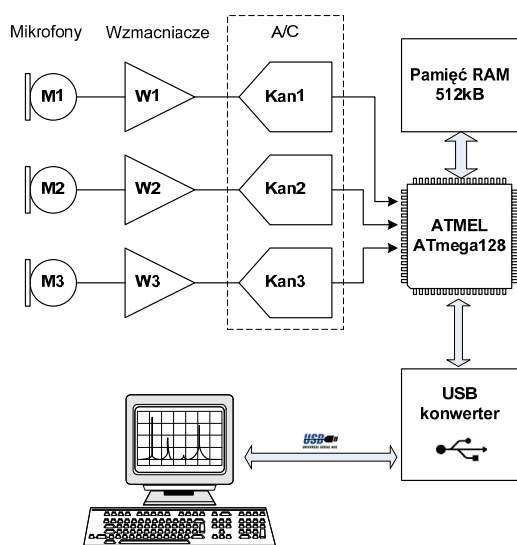
Przy założeniu, że prąd zasilający oprócz składowej podstawowej posiada również wyższe harmoniczne, można dojść do wniosku, że widmo sygnałów wibroakustycznych silnika z uszkodzonym wirnikiem będzie zawierało składowe związane z częstotliwością sieci zasilającej oraz wymienione częstotliwości sumacyjno-różnicowe. W związku z tym, jedną z metod wykrywania uszkodzeń wirników może być analiza częstotliwościowa sygnałów wibroakustycznych, polegająca na ekstrakcji charakterystycznych składowych z widma sygnału drganiowego lub akustycznego [1].

3. Analizator sygnałów akustycznych

Na potrzeby badań eksperymentalnych została opracowana konstrukcja trzykanałowego analizatora sygnałów akustycznych, który rejestruje

sygnały akustyczne pochodzące z trzech mikrofonów pomiarowych, a następnie przesyła je za pośrednictwem interfejsu USB do komputera, na którym jest zainstalowane oprogramowanie diagnostyczne.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat blokowy analizatora akustycznego. Głównym elementem urządzenia jest 8-bitowy mikrokontroler ATmega128 rodziny AVR, który steruje pracą przetworników A/C, zapisuje próbki pomiarowe do pamięci, a następnie przesyła je do komputera za pośrednictwem szybkiego łącza USB. Analogowy interfejs wejściowy analizatora stanowią trzy programowalne wzmacniacze wejściowe, do realizacji, których zastosowano niskoszumowe wzmacniacze operacyjne ze stopniem wejściowym wykorzystującym tranzystory JFET.



Rys. 1. Schemat blokowy analizatora akustycznego.

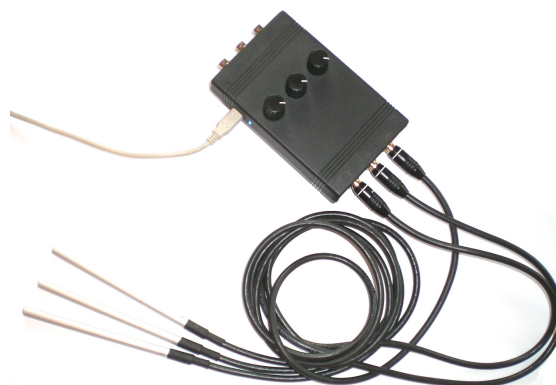
W roli mikrofonów pomiarowych zastosowano znane przetworniki elektretowe typu WM-61A produkowane przez firmę Panasonic, które posiadają płaską charakterystyką częstotliwościową w całym paśmie akustycznym (20Hz-20kHz). Pomimo stosunkowo niskiej ceny, mikrofony te odznaczają się bardzo dobrymi parametrami, dzięki czemu są powszechnie wykorzystywane m.in. w profesjonalnej aparaturze pomiarowej do analizy właściwości akustycznych pomieszczeń estradowych.

Przetworniki A/C posiadają 14-bitową rozdzielczość i umożliwiają rejestrację sygnałów w pełnym zakresie częstotliwości akustycznych (20Hz-20kHz). Próbkę sygnałów pomiarowych gromadzone są w wewnętrznej pamięci RAM urządzenia, a po zakończeniu akwizycji wysyłane są do komputera przez interfejs USB. We-

wnętrzna pamięć rejestratora ma pojemność 512kB, co umożliwia zapisanie maksymalnie ok. 80 tysięcy próbek dla każdego kanału pomiarowego.

Oprogramowanie analizatora akustycznego zostało napisane w języku Object Pascal, w środowisku Borland Delphi 7.0. Do najważniejszych zadań programu należą: parametryzacja analizatora i sterowanie procesem akwizycji danych, analiza częstotliwościowa zmierzonych sygnałów, prezentacja wyników pomiarów i analiz (przebiegi czasowe, widma częstotliwościowe) oraz archiwizacja próbek pomiarowych. Zarejestrowane sygnały akustyczne mogą być zapisane na dysku komputera w postaci plików tekstowych, zawierających próbki pomiarowe oraz w formacie plików typu (*.mat), rozpoznawalnym przez oprogramowanie MATLAB-SIMULINK. Dzięki temu możliwe jest dalsze przetwarzanie zmierzonych sygnałów, przy wykorzystaniu zaawansowanych metod diagnostycznych.

Na rysunku 2 przedstawiono fotografię analizatora akustycznego wraz z mikrofonami pomiarowymi.



Rys. 2. Fotografia analizatora akustycznego.

4. Badania eksperymentalne silnika z uszkodzeniami łożysk i wirnika

4.1. Przedmiot i zakres badań

W badaniach eksperymentalnych wykorzystano silnik indukcyjny INDUKTA SG100L-4B-M o mocy 3kW i znamionowej prędkości obrotowej 1400 obr/min. Silnik ten był sprzęgnięty z prądnicą DC, realizującą funkcję obciążenia. Badany silnik wyposażony był w zestaw wymiennych wirników, w których zamodelowano różne warianty uszkodzeń klatki (przerwane pręty od 1 do 10). Oprócz tego wirniki posiadały wymienne łożyska, w których spreparowano trzy rodzaje uszkodzeń: uszkodzenie elementu

tocznego (kulki), uszkodzenie bieżni wewnętrznej, uszkodzenie bieżni zewnętrznej. Na stanowisku laboratoryjnym zainstalowane były przyrządy do pomiaru napięć, prądów fazowych, prędkości obrotowej silnika oraz momentu obciążenia.

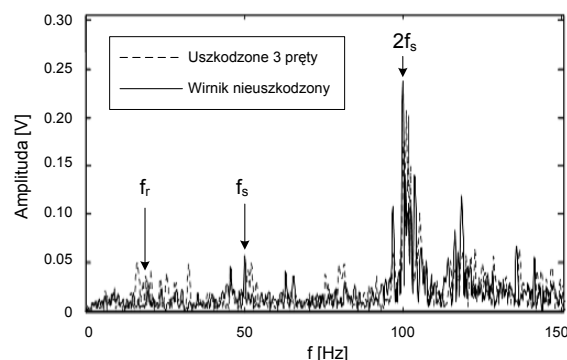
Badania podzielono na dwie części: pomiary akustyczne silnika z uszkodzonym wirnikiem oraz pomiary akustyczne silnika z uszkodzonym łożyskiem. Badany silnik zasilany był bezpośrednio z sieci energetycznej i pracował przy różnych wartościach momentu obciążenia: 0%, 25%, 50%, 75% i 100%, w odniesieniu do momentu znamionowego M_N . Dla każdego wariantu uszkodzenia rejestrowano sygnały akustyczne pochodzące z trzech mikrofonów pomiarowych, rozstawionych w różnych odległościach od badanego silnika. Zarejestrowane sygnały akustyczne emitowane przez uszkodzony silnik zostały poddane dalszemu przekształceniom, w celu znalezienia najlepszych metod analizy tych sygnałów, pod kątem przydatności ich do celów diagnostyki. Podstawowym przekształceniem stosowanym przy analizie częstotliwościowej była szybka transformata Fouriera (FFT), której produktem było widmo amplitudowe sygnału akustycznego. Oprócz tego, analizie częstotliwościowej poddana została obwiednia sygnału akustycznego oraz obwiednia funkcji autokorelacji tego sygnału [3, 4].

4.2. Uszkodzenia wirnika – wyniki badań

Sygnały akustyczne, zarejestrowane podczas badań eksperymentalnych silnika z uszkodzonym wirnikiem, zostały poddane analizie częstotliwościowej przy wykorzystaniu metody FFT. Celem tych analiz było znalezienie w widmie tych sygnałów charakterystycznych składowych częstotliwościowych, związanych z uszkodzonym wirnikiem. W celu redukcji przecieku widmowego, przed wykonaniem transformacji fourierowskiej próbki sygnałów pomiarowych zostały przemnożone przez funkcję okna „FlatTop”. Operacja ta dodatkowo zwiększyła dokładność odwzorowania amplitud poszukiwanych składowych spektralnych w wyznaczonych widmach [5].

Na rysunku 3 przedstawiono widma częstotliwościowe sygnałów akustycznych zarejestrowanych dla silnika z wirnikiem nieuszkodzonym (W0) oraz z wirnikiem, w którym przerwano 3 pręty klatki (W3). Na podstawie znajomości prędkości silnika i częstotliwości

sieci zasilającej wyznaczono położenie charakterystycznych składowych spektralnych (f_s , $2f_s$, f_r).



Rys.3. Widmo sygnału akustycznego dla wirników W0 oraz W3.

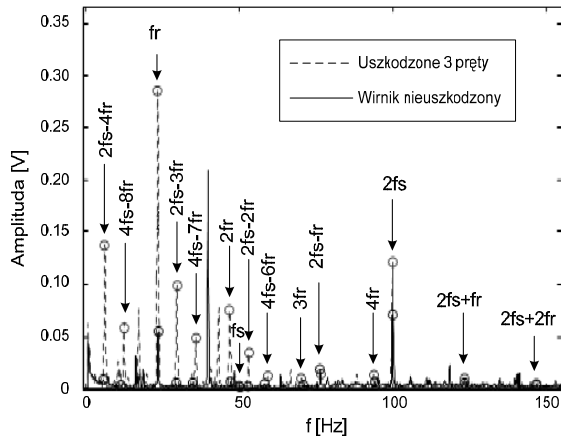
Porównując widmo dla wirnika uszkodzonego oraz nieuszkodzonego, można stwierdzić, że są one do siebie bardzo podobne. W związku z tym można sformułować wniosek, że klasyczna analiza FFT sygnału akustycznego nie nadaje się do wykrywania uszkodzeń wirnika. Przyczyną tego jest fakt, że sygnał akustyczny oprócz niskoczęstotliwościowych składowych związanych z uszkodzeniami silnika zawiera całą gamę składowych o wyższych częstotliwościach, które ulegają dodatkowym intermodulacjom. Ponadto sygnał ten jest na ogół mocno zaszumiony, co powoduje, że ekstrakcja składowych uszkodzeniowych o małych amplitudach jest bardzo trudna, a często niemożliwa.

Jedną z metod ekstrakcji niskoczęstotliwościowych składowych sygnału zmodulowanego jest demodulacja amplitudowa, polegająca na wyznaczeniu obwiedni tego sygnału. Do tego celu można zastosować transformatę Hilberta, która na podstawie próbek sygnału rzeczywistego oblicza jego część urojoną, przesuniętą o 90 stopni w stosunku do sygnału rzeczywistego. Moduł tak uzyskanego sygnału zespolonego stanowi obwiednię pierwotnego sygnału zmodulowanego. Widmo wyznaczonej obwiedni pozwoli uzyskać informację o częstotliwościach modulujących [6].

Aby dodatkowo polepszyć czytelność tego widma, można przed wyznaczeniem obwiedni znaleźć funkcję autokorelacji rzeczywistego sygnału akustycznego, a następnie zastosować opisaną wyżej metodę analizy obwiedni. Uzyskane w ten sposób widma będą bardziej czytelne, pozbawione szumów, co znacznie ułatwi ekstrakcję charakterystycznych składowych częstotliwościowych związanych z uszkodze-

niem silnika. Metoda ta została szerzej opisana w [3, 4].

Na rysunku 4 przedstawiono widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego dla silnika z nieuszkodzonym wirnikiem oraz z wirnikiem z 3 przerwanymi prętami klatki.

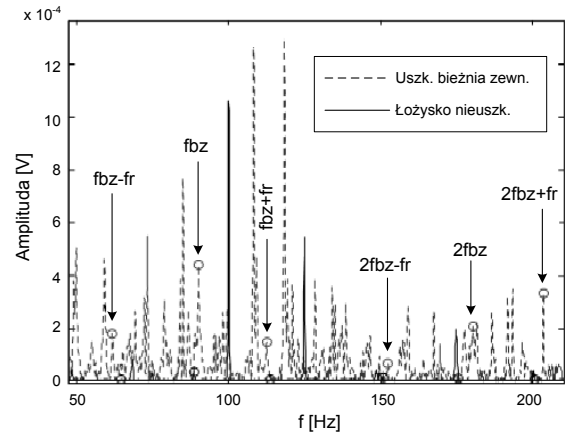


Rys. 4. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego dla wirników W0 oraz W3 w zakresie częstotliwości 0-150Hz.

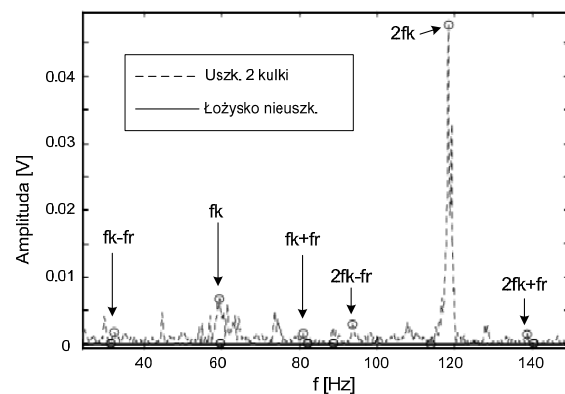
W porównaniu z rysunkiem 3 można stwierdzić, że uzyskane widmo jest bardzo wyraziste i zawiera wiele składowych spektralnych powiązanych z częstotliwością obrotową f_r . Ponadto daje się zauważyć wyraźna różnica pomiędzy widmem silnika uszkodzonego a nieuszkodzonego. Przeprowadzone badania dowiodły, że nawet w przypadku przerywania tylko jednego pręta klatki wirnika, w widmie pojawiły się charakterystyczne składowe, które jednoznacznie klasyfikują ten wirnik do grupy wirników uszkodzonych. Z tego względu można stwierdzić, że analiza sygnałów akustycznych może być z powodzeniem wykorzystana, jako bezinwazyjna metoda diagnostyczna do wykrywania uszkodzeń wirników, w napędach z silnikami indukcyjnymi klatkowymi.

4.3. Uszkodzenia łożysk – wyniki badań

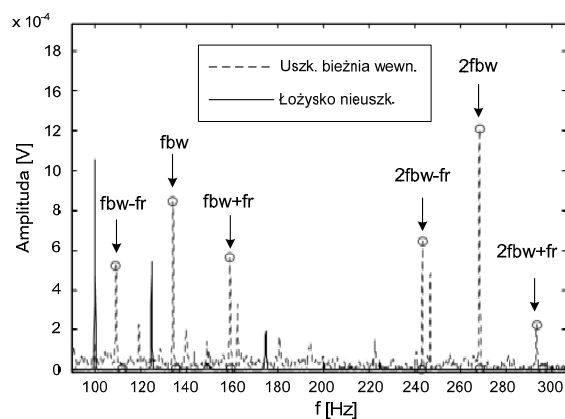
W badaniach eksperymentalnych silnika z uszkodzonym łożyskiem do analizy diagnostycznej wykorzystano metodę analizy częstotliwościowej obwiedni funkcji autokorelacji sygnałów akustycznych. Na rysunkach 5-7 przedstawiono widma obwiedni funkcji autokorelacji sygnałów akustycznych zarejestrowanych dla poszczególnych uszkodzeń łożyska, w zestawieniu z widmem obliczonym dla łożyska nieuszkodzonego. Poszczególne składowe spektralne, charakteryzujące dany typ uszkodzenia zostały obliczone na podstawie zależności (1)÷(6).



Rys. 5. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego dla przypadku uszkodzenia bieżni zewnętrznej łożyska.



Rys. 6. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego dla przypadku uszkodzenia elementów tocznych łożyska.



Rys. 7. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego dla przypadku uszkodzenia bieżni wewnętrznej łożyska.

Przedstawione wyniki analiz diagnostycznych wskazują jednoznacznie, że we wszystkich przebadanych przypadkach uszkodzenia łożyska uzyskano bardzo dobrą widoczność składowych uszkodzeniowych. Szczególnie wyrazi-

sty jest przypadek uszkodzenia dwóch kulek (rys.6), dla którego amplituda składowej $2f_k$ przyjmuje dominującą wartość. Z kolei widmo uzyskane dla przypadku uszkodzenia bieżni wewnętrznej (rys.7) charakteryzuje się znaczącym wzrostem wszystkich składowych uszkodzeniowych oraz bardzo dobrą przejrzystością. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie analizy częstotliwościowej obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego umożliwia skuteczną detekcję uszkodzeń występujących w łożysku. Znajomość wymiarów geometrycznych łożyska pozwala dodatkowo na identyfikację typu uszkodzenia.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania eksperymentalne wykazały, że pracujący układ napędowy, w którym występują uszkodzenia mechaniczne lub elektryczne, emituje sygnały akustyczne zawierające symptomy tych uszkodzeń. Dlatego też, przy zastosowaniu odpowiednich metod analizy tych sygnałów możliwe jest zaprojektowanie i wykonanie systemu diagnostycznego do monitorowania i diagnostyki maszyn i urządzeń elektrycznych.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie klasycznej analizy częstotliwościowej sygnału akustycznego nie pozwala uzyskać zadowalających rezultatów. Dopiero wykorzystanie bardziej złożonych funkcji analitycznych, takich jak: funkcja autokorelacji oraz analiza spektralna obwiedni umożliwiają skuteczną detekcję i identyfikację uszkodzeń silnika, takich jak uszkodzenia łożysk czy uszkodzenia klatki wirnika.

Przy projektowaniu aparatury diagnostycznej wykorzystującej sygnały akustyczne należy wziąć pod uwagę specyficzne właściwości fal dźwiękowych. W szczególności należy pamiętać o zależności barwy sygnału dźwiękowego od odległości mikrofonów od źródła, od

kształtu i geometrii pomieszczenia oraz od rozmieszczenia przestrzennego mikrofonów pomiarowych. Z uwagi na fakt, że diagnostyczne cechy zawarte w sygnale akustycznym mają stosunkowo małe wartości, niezbędne jest stosowanie wysokiej, jakości mikrofonów i niskosumowych wzmacniaczy w torach pomiarowych. Do wad akustycznych detektorów uszkodzeń zaliczyć można również stosunkowo dużą wrażliwość na hałas pochodzący od źródeł zewnętrznych.

6. Literatura

- [1] Cempel C., *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*, PWN, Warszawa 1989
- [2] Kowalski Cz.T., *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*, PNIMNiPE PWr. nr 57, ser. Monografie, nr 18, Wrocław 2005
- [3] Kupczyński K., *Akustyczny detektor uszkodzeń silnika indukcyjnego*, Magisterska praca dyplomowa, Politechnika Wroclawska 2010
- [4] Pawlak M, Kupczyński K., *Akustyczny detektor uszkodzeń silnika indukcyjnego*, PNIMNiPE PWr., Studia i Materiały 2010, nr 30, s. 344-354.
- [5] Pawlak M., *Zastosowanie funkcji okien czasowych w diagnostyce wirników silników indukcyjnych*, PNIMNiPE PWr. Studia i Materiały. 2008, nr 28, s. 520-527
- [6] Zieliński T.P., *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*, WKŁ, Warszawa 2007

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy rozwojowy Nr R0101403.

Autor

dr inż. Marcin Pawlak, Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, tel. (71) 3204291, e-mail: marcin.pawlak@pwr.wroc.pl.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Andrzej Bytnar