

Wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych i klatek wirników silników indukcyjnych w oparciu o sygnały akustyczne

Jarosław Starczyński, Maciej Sułowicz

1. Wstęp

Silniki indukcyjne są najczęściej stosowanymi maszynami elektrycznymi w przemyśle. Popularność swą zyskały dzięki niskim kosztom produkcji i eksploatacji oraz tym, że wytwarzane są w wielu odmianach i mocach znamionowych [1]. Z uwagi na to, że pełnią one ważne role w wielu procesach technologicznych, konieczna jest ich diagnostyka. Diagnostyka techniczna urządzeń jest obecnie stosowana w prawie każdej gałęzi przemysłu [1–10]. Istnieje wiele metod monitoringu stanu technicznego obiektu. Najczęściej urządzenia pomiarowe wymagają ingerencji w badaną maszynę, co nie zawsze jest możliwe. Dlatego w takich przypadkach stosuje się metody diagnostyczne, które nie wymagają przestoju maszyny, a badania można przeprowadzać podczas jej normalnej pracy [3].

2. Badania laboratoryjne

Na potrzebę wykonania pomiarów zbudowane zostało stanowisko laboratoryjne składające się z silnika indukcyjnego klatkowego Sg112M-4 (4 kW, 1435 obr./min) produkcji TAMEL, z łożyskami tocznymi 6306, układu obciążenia zawierającego prądnicę wraz z układem regulacji obciążenia, urządzeń pomiarowych oraz systemu akwizycji danych. Podstawowym sprzętem pomiarowym w tym zestawie są oczywiście mikrofony. W układzie pomiarowym zastosowano trzy sztuki mikrofonów rozstawionych w odległości ok. 40 cm od silnika. Dwie sztuki stanowiły mikrofony oparte o powszechnie stosowaną w mikrofonach pomiarowych wkładkę Panasonic WM-61a. Mikrofony te zawierają wewnętrzny przedwzmacniacz o zmiennym wzmocnieniu x10 oraz x100, a zasilane są bateryjne. Trzecim mikrofonem był mikrofon Roga RG-50. Przedwzmacniacz tego mikrofonu wymagał zewnętrznego zasilania ze źródła napięcia stałego 4–30 V z kondycjonera sygnałów PA-3000. Do rejestracji prędkości obrotowej posłużył momentomierz DATAFLEX z terminalem DF1. Z tego urządzenia, poza sygnałem zawierającym moment na wale, można pozyskać informację o aktualnej prędkości obrotowej. Dodatkowo mierzone również były trzy prądy fazowe zasilające badany silnik oraz drgania przy użyciu akcelerometru zamontowanego na tarczy łożyskowej od strony przeciwnapędnej.

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy, na którym widoczne są wszystkie urządzenia użyte przy pomiarach oraz układ ich połączeń. Na rys. 2 przedstawiono silnik oraz mikrofony pomiarowe.

Podczas badań silnik oraz prądnica stanowiąca jego obciążenie zamontowane były na jednej stalowej ramie oraz zostały

Streszczenie: W artykule omówiono opracowane i sprawdzone na stanowisku laboratoryjnym metody diagnostyki silników indukcyjnych klatkowych. Metody te pozwalają na ocenę stanu silnika w oparciu o sygnały akustyczne emitowane przez silnik podczas normalnej pracy. Zaprezentowano wyniki pomiarów uzyskane dla różnych uszkodzeń silników indukcyjnych oraz rezultaty analiz zebranych danych przy pomocy różnych metod. Do analiz diagnostycznych zastosowano analizę czasowo-częstotliwościową STFT i analizę obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego. W podsumowaniu artykułu zawarto propozycję skutecznego algorytmu oceny rodzaju uszkodzenia silników indukcyjnych na podstawie sygnałów akustycznych. Sformułowano wnioski co do możliwości zastosowania tylko sygnałów akustycznych do wykrywania uszkodzeń silników indukcyjnych.

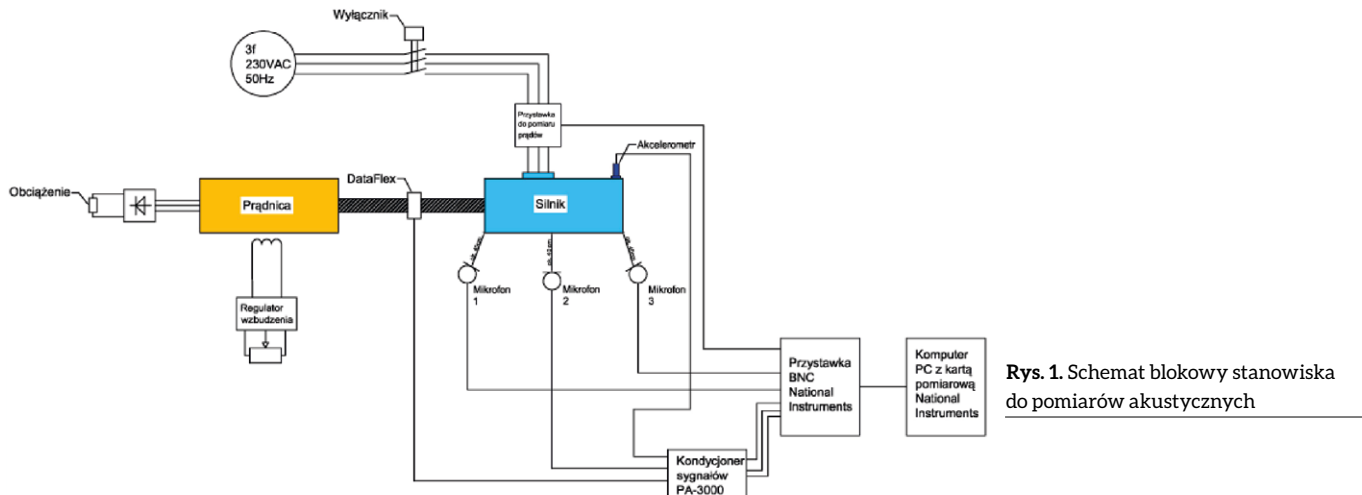
Słowa kluczowe: sygnały akustyczne, diagnostyka silnika indukcyjnego, uszkodzenia łożysk, uszkodzenia klatki

🇬🇧 FAULT DETECTION OF INDUCTION MOTORS BASED ON ACOUSTIC SIGNALS

Abstract: This paper presents elaborated cage induction machine diagnostics methods, tested on laboratory test bench. These methods allow for motor's condition assessment basing on acoustic signals emitted by the machine during operation. Measurement results obtained for different machine faults were presented together with results of analyses of collected data using different signal processing methods. For diagnostic analyses, time-frequency STFT method and analysis of autocorrelation function's envelope of acoustic signal were used. In conclusion of the paper, proposition of effective algorithm of fault type detection of induction machine basing on acoustic signal, was presented. Conclusion about possibility of application of acoustic signals only for fault detection of induction machines was developed.

Keywords: acoustic signals, induction motor diagnostic, bearing damage, cage damage

połączone wałem, na którym zamontowany był wspomniany wcześniej momentomierz DATAFLEX.



Rys. 1. Schemat blokowy stanowiska do pomiarów akustycznych



Rys. 2. Rozmieszczenie mikrofonów wokół silnika

czyną awarii. Wykrycie uszkodzenia w zbyt późnym stadium prowadzi do uszkodzeń wtórnych, takich jak [5]:

- uszkodzenie bieżni wewnętrznej;
- uszkodzenie bieżni zewnętrznej;
- uszkodzenie elementu toczonego;
- uszkodzenie koszyka [5].

Konstrukcyjne powody drgań mogą być spowodowane uszkodzeniem elementu toczonego, koszyka lub przejściem elementu toczonego przez punktowe uszkodzenie bieżni łożyska. Ocena stanu elementów łożysk dokonywana jest na podstawie widm drgań i opiera się na założeniu, że punktowe uszkodzenia powierzchni powodują drgania o charakterystycznych częstotliwościach. Można je wyznaczyć na podstawie znajomości parametrów geometrycznych łożyska oraz prędkości obrotowej [5]. Częstotliwość obrotowa (rotacji):

$$f_r = \frac{n}{60} \quad (1)$$

Częstotliwość koszyka:

$$f_{ko} = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\theta\right) \quad (2)$$

Częstotliwość przetaczania po zewnętrznym pierścieniu:

$$f_{bz} = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\theta\right) \cdot N_b \quad (3)$$

Częstotliwość przetaczania po wewnętrznej bieżni:

$$f_{bw} = (f_r - f_c) \cdot N_b = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\theta\right) \cdot N_b \quad (4)$$

Częstotliwość kulek:

$$f_k = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \frac{P_d}{B_d} \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\theta\right)^2\right) \quad (5)$$

2.1. System akwizycji sygnałów

Wszystkie sygnały rejestrowane były przy użyciu karty pomiarowej NI PCI-6221 z terminalem BNC-2120. Sygnały rejestrowano z częstotliwością 44,15 kHz przez okres 16 s. Taka ilość danych umożliwiła wybranie z całości nagrania charakterystycznych fragmentów o długości 5 s. Dane zapisywane były w postaci wektora w formacie .mat-pliku przez program napisany w środowisku MATLAB. Silnik podczas pomiarów obciążony był momentem znamionowym. Po wcześniejszych próbach do analizy wybrano sygnał z mikrofonu umiejscowionego prostopadle do wału układu napędowego z tyłu silnika.

2.2. Uszkodzenia silnika

Łożyska to jedne z najbardziej powszechnych, a zarazem odpowiedzialnych elementów maszyn elektrycznych. Ich zadaniem jest przenoszenie obciążeń roboczych z wirnika na korpus przy możliwie małych oporach toczenia i pozycjonowaniu elementu [4]. Efektem niewłaściwej eksploatacji lub złego doboru łożyska może być jego przedwczesne zużycie, co może być przy-

gdzie:

- n – prędkość obrotowa [obr./min];
- N_b – liczba elementów tocznych (kulek lub rolek);
- B_d – średnica elementu tocznego [mm];
- P_d – średnica podziałowa łożyska [mm];
- θ – kąt naporu (dla łożyska kulkowego zwykłego wynosi 0°) [$^\circ$];
- $f_r, f_{ko}, f_{bz}, f_{bw}, f_k$ – charakterystyczne częstotliwości określone wzorami (1) do (5), [Hz].

W celu pozyskania sygnałów akustycznych pochodzących od uszkodzonego silnika należało przygotować elementy silnika zawierające dany rodzaj uszkodzenia. Przygotowano uszkodzenia dwóch kluczowych elementów: klatki wirnika i łożysk. Do badań zastosowano specjalnie przygotowane na etapie produkcji wirniki z przerwą jednego pręta klatki, przerwą dwóch sąsiednich prętów oraz przerwą 1 i 4 pręta. Do badania uszkodzeń łożysk zostało przygotowanych pięć łożysk. W łożyskach tych precyzyjną szlifierką uszkodzono w każdym z nich inny element. Zrealizowano uszkodzenie bieżni zewnętrznej, wewnętrznej, jednej kulki, dwóch kulek oraz równoczesne uszkodzenie bieżni zewnętrznej i wewnętrznej. Sposób przygotowania uszkodzeń łożysk został przedstawiony na rys. 3. Czerwone linie określają miejsca nacięcia elementów.

Uszkodzenie prętów klatki wirnika polegało na odizolowaniu jednego końca pręta od pierścienia zwierającego.

3. Analizy zarejestrowanych sygnałów

W celu wyodrębnienia symptomów uszkodzeń sygnały zostały poddane różnym analizom. W artykule zostały opisane dwie najskuteczniejsze analizy, o które można oprzeć diagnostykę akustyczną silnika indukcyjnego. Wszystkie analizy przeprowadzono na sygnałach napięciowych dostępnych z wyjść mikrofonów bez ich skalowania w jednostkach ciśnienia akustycznego.

3.1. Analiza spektrogramów oraz widm obwiedni funkcji autokorelacji sygnałów akustycznych

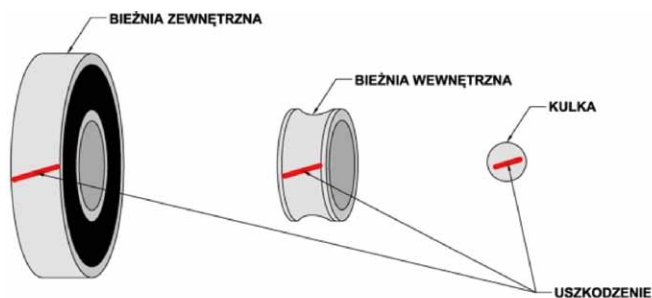
Jako pierwszą analizę zastosowano analizę czasowo-częstotliwościową STFT. Jako sygnał wejściowy zostało użyte nagranie o pełnej długości 16 s. Spektrogramy będące graficznym wynikiem analizy STFT stanowiły cenne narzędzie przy określaniu fragmentu nagrania użytego do dalszej analizy.

Spektrogram sygnału akustycznego silnika bez uszkodzeń zawiera sygnały zakłóceń pochodzące od urządzeń sprzężonych z silnikiem, czyli momentomierza i prądnicy. Zostały one zaznaczone na rys. 4.

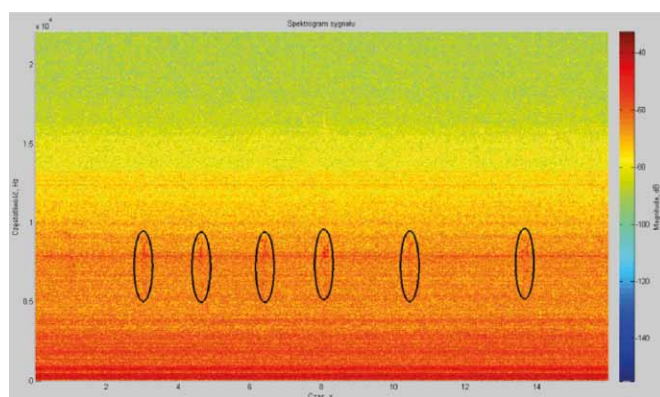
Poniższy wykres przedstawia spektrogram sygnału akustycznego dla silnika z uszkodzoną jedną kulką łożyska. Widoczne są charakterystyczne dla uszkodzenia kulki zakłócenia w zakresie wysokich i średnich częstotliwości akustycznych. Najbardziej zauważalne są one w zakresie 10–20 kHz.

Takie same zakłócenia pojawiły się również w sygnale silnika z uszkodzonymi dwiema kulkami łożyska.

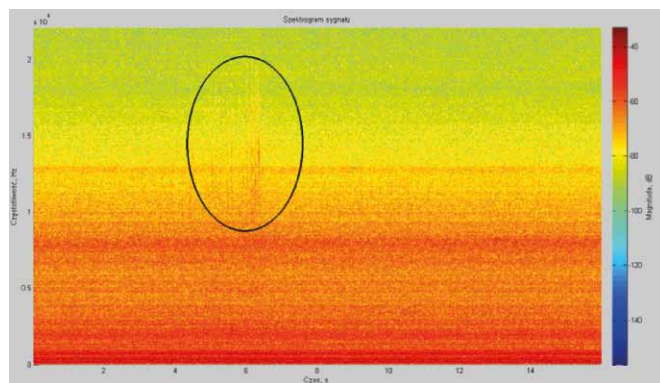
Warto również zauważyć, że zakłócenia występują jedynie przez krótki czas ok. 2 s i potwierdza to zasadność rejestracji tak dużej ilości próbek.



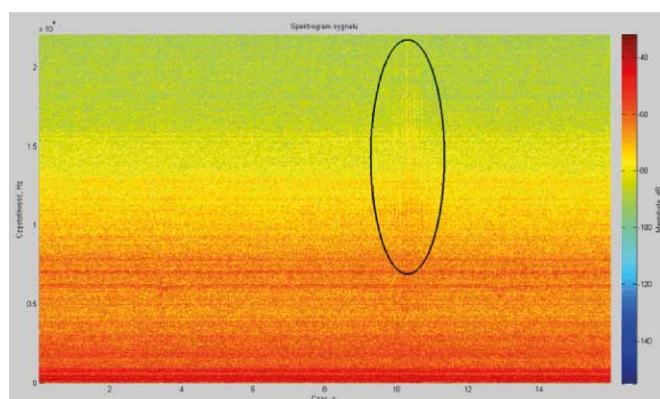
Rys. 3. Uszkodzenie bieżni wewnętrznej, zewnętrznej i kulki łożyska kulkowego tocznego



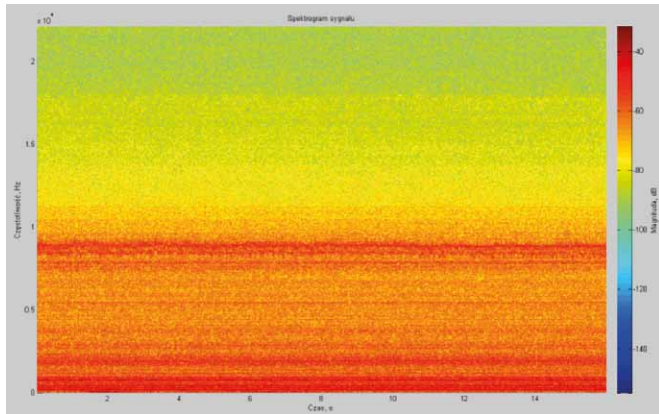
Rys. 4. Spektrogram sygnału akustycznego dla silnika bez uszkodzeń



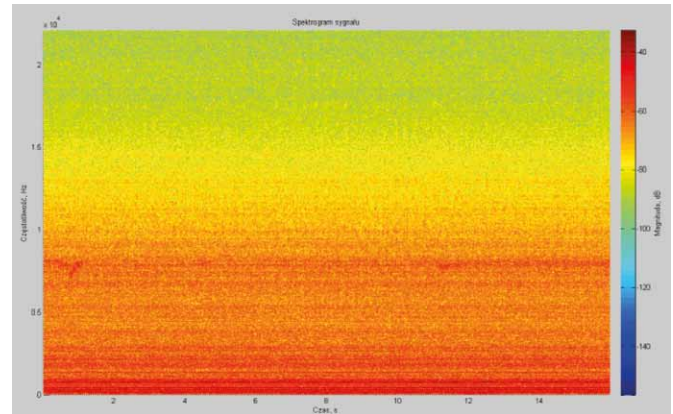
Rys. 5. Spektrogram sygnału akustycznego dla uszkodzonej jednej kulki łożyska



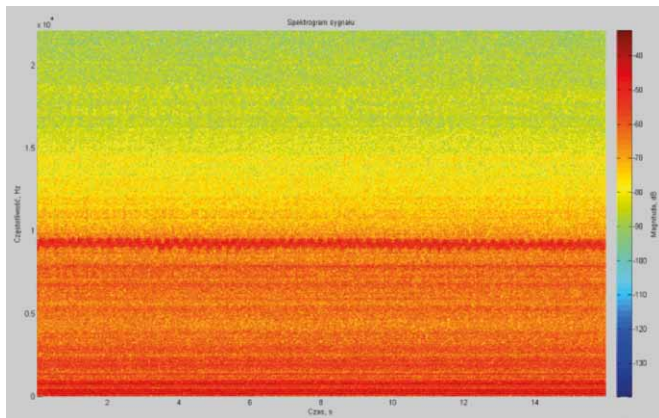
Rys. 6. Spektrogram sygnału akustycznego dla uszkodzonych dwóch kulek łożyska



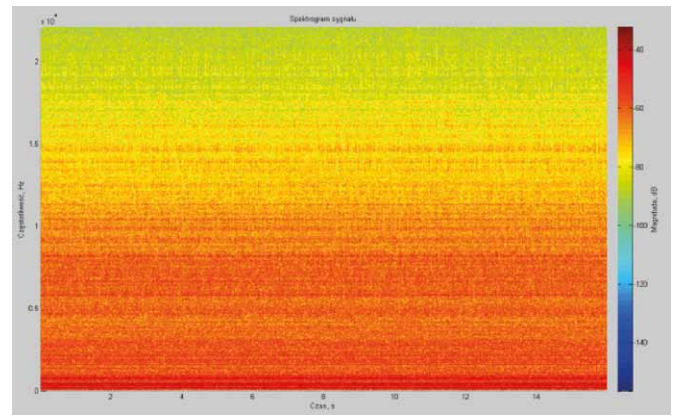
Rys. 7. Spektrogram sygnału akustycznego dla uszkodzonego jednego pręta klatki wirnika



Rys. 9. Spektrogram sygnału akustycznego silnika z uszkodzonymi prętami 1 i 4 klatki wirnika



Rys. 8. Spektrogram sygnału akustycznego dla uszkodzonych dwóch prętów klatki wirnika



Rys. 10. Spektrogram sygnału akustycznego silnika z uszkodzonymi łożyskami wewnętrzną i zewnętrzną

Kolejnymi przykładami są spektrogramy dla uszkodzeń prętów klatki wirnika. Uszkodzenie jednego oraz dwóch sąsiednich prętów klatki wirnika powoduje wzrost amplitudy sygnałów z przedziału 8,8–9,3 kHz. Występują one na rys. 4 i rys. 5 w całej długości nagrania, z tym, że w przypadku uszkodzenia dwóch sąsiednich prętów składowa ta jest modulowana z częstotliwością ok. 3,6 Hz.

W spektrogramie dla silnika z uszkodzonymi prętami 1 i 4 nie występują żadne charakterystyczne częstotliwości mogące świadczyć o uszkodzeniu tych elementów.

Podobnie jest w przypadku pojedynczych uszkodzeń łożysk zewnętrznej oraz wewnętrznej. Natomiast defekt obu łożysk jest przyczyną powstania sygnałów akustycznych o zmiennej intensywności i szerokim paśmie częstotliwości. Szczególnie widoczne są one w zakresie wysokich częstotliwości akustycznych w przedziale 14–16,5 kHz.

Analiza STFT nie pozwala wprawdzie uzyskać dobrej wykrywalności we wszystkich przypadkach uszkodzeń jednak daje ogólną informację na temat zawartości składowych częstotliwości w sygnale. Daje to podstawę do wyboru odpowiedniego krótszego fragmentu nagrania do dalszych analiz.

3.2. Analiza obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego

Sygnały pomiarowe używane w diagnostyce najczęściej zawierają dużą ilość szumów i zakłóceń. Mogą pochodzić one od urządzeń pomiarowych ich wzmacniaczy i innych podzespołów, jednak większym ich źródłem jest otoczenie zewnętrzne oraz urządzenie sprzężone mechanicznie z badanym urządzeniem. Usuwanie szumów może być zrealizowane przy użyciu transformaty falkowej lub dedykowanych do tego celu skomplikowanych algorytmów wykorzystywanych w programach, np. SONY Sound Forge. Podczas analizy sygnałów akustycznych pochodzących z silnika w celu usunięcia szumów i zwiększenia czytelności widm posłużono się funkcją autokorelacji. Jest ona wykorzystywana do detekcji okresowości sygnałów periodycznych w szumie oraz identyfikacji przebiegów. Wiele sygnałów pomiarowych zawiera składowe o niskiej częstotliwości, lecz nie są one widoczne w widmie sygnału, ponieważ są zmodulowane amplitudowo przez sygnały o znacznie wyższej częstotliwości. W celu odseparowania składowych niskoczęstotliwościowych z sygnału pomiarowego należy poddać go demodulacji AM. Jedną z dostępnych metod jest wyznaczenie obwiedni takiego

sygnału. Zadanie to można wykonać przy użyciu filtracji lub transformaty Hilberta. W analizie tej pierwotny sygnał akustyczny został poddany autokorelacji, a następnie transformacji Hilberta. Kolejnym krokiem było okienkowanie, czyli pomnożenie go przez okno czasowe. Najczęściej stosowanym oknem przy analizach sygnałów akustycznych jest okno Hamminga, które charakteryzuje się najlepszym spośród dostępnych oknem rozróżnieniem częstotliwości [6]. Jednak w diagnostyce opartej o analizę widma największe znaczenie ma amplituda charakterystycznych częstotliwości, dlatego też użyte zostało okno FlatTop, najlepiej oddające amplitudę składowych sygnałów. Ostatnim krokiem było wyznaczenie widma przy pomocy transformacji FFT.

W celu łatwego porównania widm sygnałów silnika zdrowego i uszkodzonego widma zostały wykreślone różnymi kolorami. Niebieski kolor odpowiada silnikowi zdrowemu, natomiast czerwony uszkodzonemu. Na rys. 11 przedstawiono widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego silnika z uszkodzonym jednym prętem klatki wirnika. Na wykresie widoczny jest znaczny wzrost amplitud składowych o częstotliwościach $f_s - f_b$, $f_r - (f_s - f_b)$, $2f_s - 3f_r$, oraz 285 Hz.

Podobne cechy można zaobserwować w dwóch pozostałych przypadkach uszkodzenia klatki wirnika. Na rys. 12 i 13 pokazano kolejno wykres dla silnika z uszkodzonymi prętami nr 1 i 2 oraz uszkodzonymi prętami nr 1 i 4. Widoczne są na nich te same charakterystyczne składowe. Częstotliwość f_b związana ze składową pola wirnika względem pola stojana, używana jest powszechnie do diagnostyki wirnika pod kątem wykrywania uszkodzenia klatki na podstawie widma prądów. Można ją opisać wzorem:

$$f_b = (1 \pm 2ks)f_s \quad (6)$$

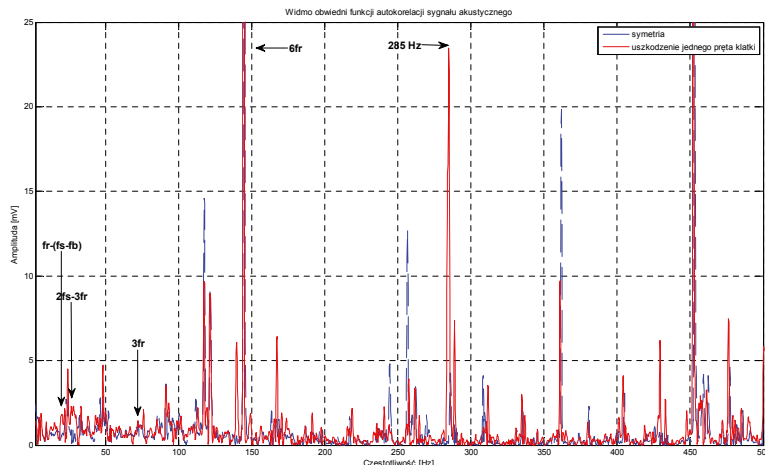
gdzie:

f_b – wykrywalne częstotliwości uszkodzeń prętów [Hz];

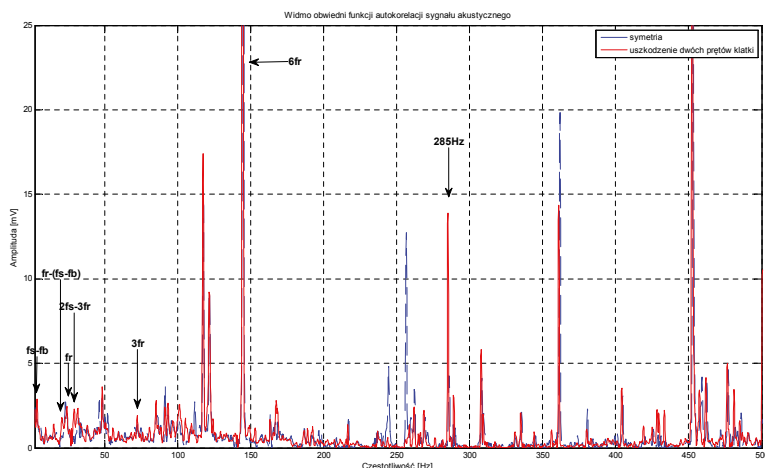
f_s – częstotliwość sieci zasilającej [Hz];

s – poślizg;

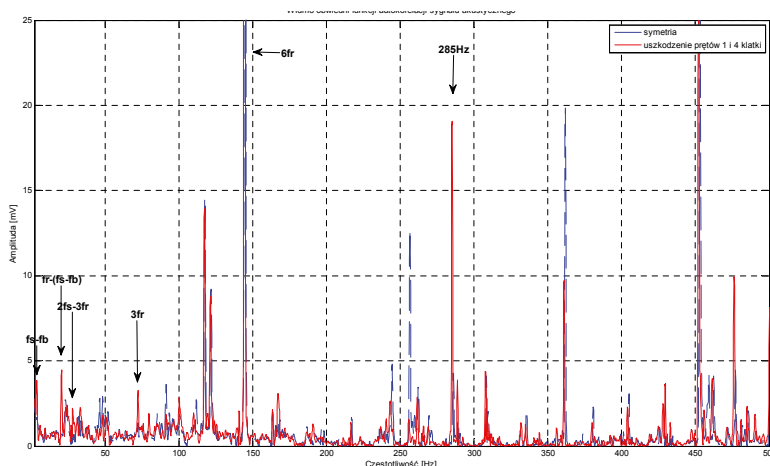
$k = 1, 2, 3, \dots$



Rys. 11. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego silnika z uszkodzonym jednym prętem klatki wirnika



Rys. 12. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego silnika z uszkodzonymi dwoma prętami klatki wirnika



Rys. 13. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego silnika z uszkodzonymi prętami 1 i 4 klatki wirnika

Występuje ona również w sygnale akustycznym, lecz nie bezpośrednio, a jako składowa częstotliwości różnicowych zależnych od f_s i f_r .

W poniższej tabeli zostały zestawione wartości amplitud kilku wybranych składowych częstotliwości. Kolorem zielonym oznaczono wartości, które nie wzrosły w stosunku do przypadku silnika zdrowego, żółtym wzrost do 2 razy i czerwonym wzrost ponaddwukrotny. Wyraźnie widać, że składowe $f_r - (f_s - f_b)$, $2f_s - 3f_r$, występujące tylko przy uszkodzeniach klatki wirnika, znacząco zwiększają swoją amplitudę, przez co są dobrym symptomem świadczącym o tego rodzaju defekcie.

Poniższe wykresy prezentują widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego silnika z uszkodzonymi elementami łożyska. Na rys. 14 pokazano wykres dla przypadku uszkodzenia jednej kulki łożyska. Zaznaczone są na nim składowe o częstotliwościach sumacyjno-różnicowych związanych z częstotliwością rotacji oraz częstotliwościami przetaczania kulek i koszyka. Przy uszkodzeniu kulek łożyska następuje wyraźny wzrost amplitudy składowych, będących w bliskim sąsiedztwie częstotliwości f_r .

Uszkodzenie bieżni wewnętrznej łożyska objawia się bardzo dużym wzrostem amplitud składowych f_r oraz jej drugiej i trzeciej wielokrotności. Widoczne są również inne składowe, charakterystyczne dla uszkodzenia bieżni wewnętrznej, $3f_{bw}$, $3f_{bw} \pm f_r$, $4f_{bw}$, $4f_{bw} \pm f_r$.

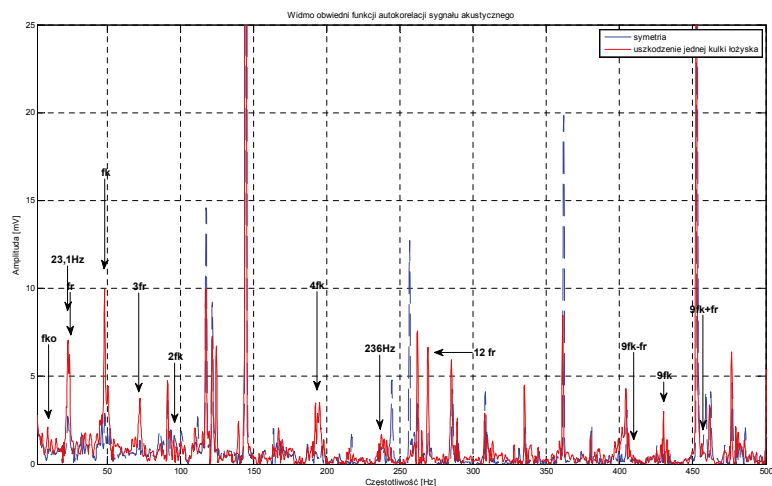
Na wykresie odpowiadającym uszkodzeniu bieżni zewnętrznej nastąpił wyraźny wzrost składowych f_{bz} , $f_{bz} \pm f_r$ i $3f_r$, a także $3f_{bz}$, $3f_{bz} - f_r$ i $4f_{bz} - f_r$.

Wykres widoczny na rys. 17 zawiera składowe łączące cechy charakterystyczne dla uszkodzeń bieżni zewnętrznej i wewnętrznej łożyska. Należy zwrócić uwagę na sygnały pochodzące od uszkodzonych kulek, świadczą o ich uszkodzeniu najprawdopodobniej wskutek przetaczania po mocno uszkodzonych bieżniach. Tak duża ilość składowych charakterystycznych wskazuje na zawansowany stopień degradacji łożyska.

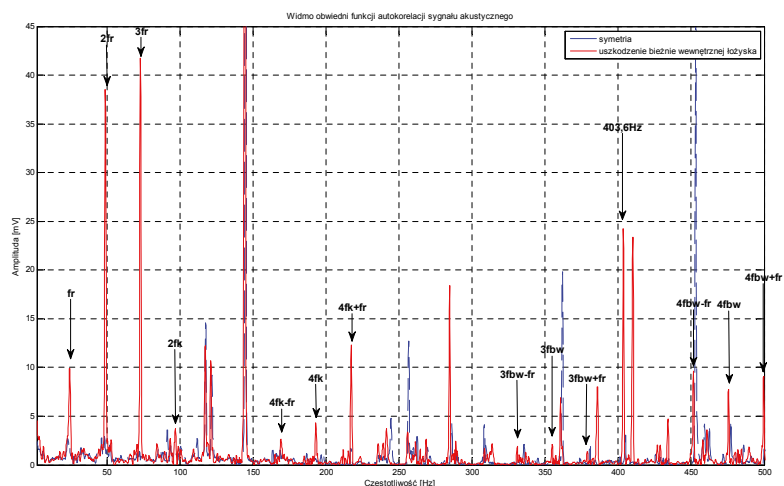
Wykres na rys. 18 może posłużyć jako porównanie powyższej analizy z tradycyjnym widmem otrzymanym przez

Tabela. 1. Wartość wybranych składowych częstotliwościowych w widmie obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego przy uszkodzeniach prętów klatki wirnika

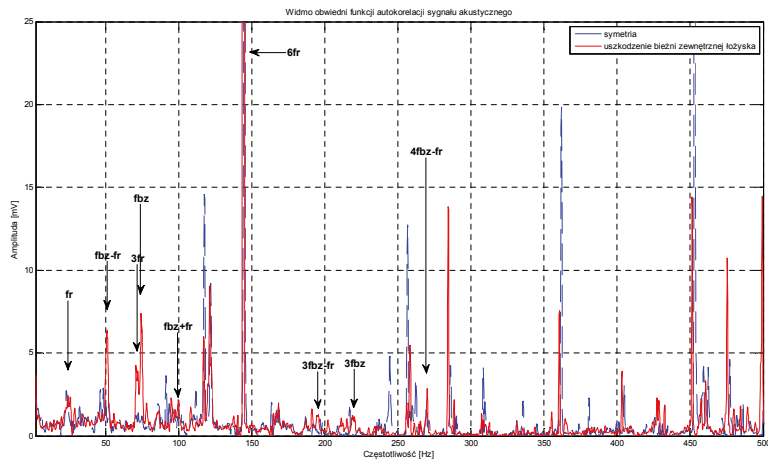
Uszkodzenie	Amplituda składowych [mV]						
	$f_s - f_b$	$f_r - (f_s - f_b)$	f_r	$3f_r$	$6f_r$	$2f_s - 3f_r$	285 Hz
Symetria	1,66	0,73	1,97	1,37	181,6	0,41	3,94
1 pręt	0,05	1,84	4,52	1,46	176	2,31	23,49
2 pręty	1,88	1,78	2,47	1,9	107,2	2,31	13,87
Pręty 1 i 4	3,85	4,48	2,41	3,27	143,5	2,22	19,7



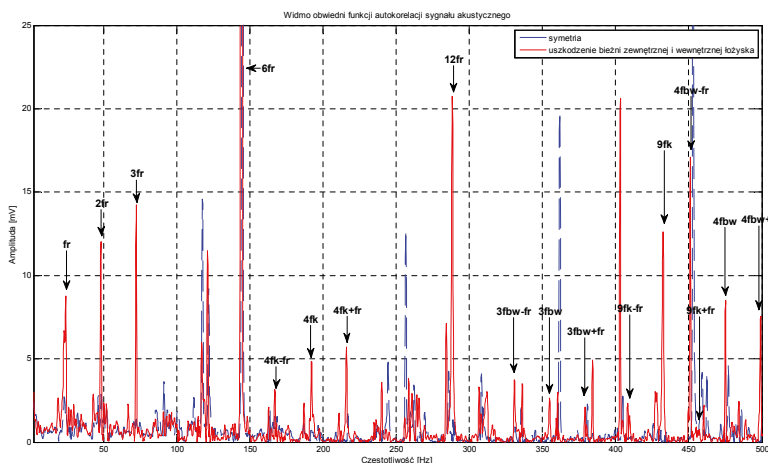
Rys. 14. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego silnika z uszkodzoną jedną kulką łożyska



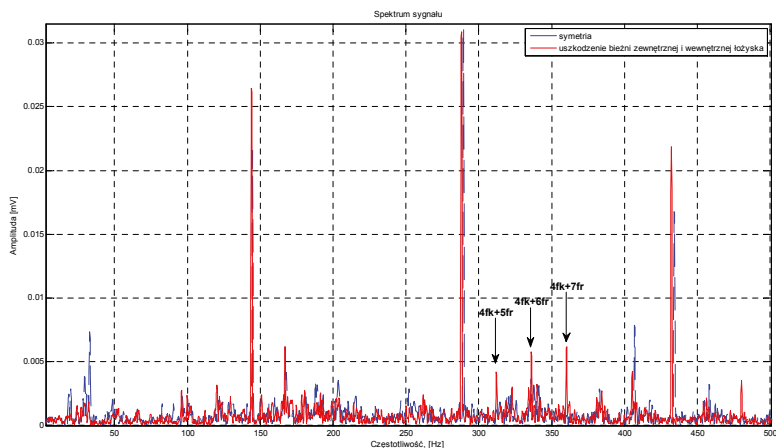
Rys. 15. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego z uszkodzoną bieżnią wewnętrzną łożyska



Rys. 16. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego silnika z uszkodzoną bieżnią zewnętrzną łożyska



Rys. 17. Widmo obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego silnika z uszkodzonymi bieżniami wewnętrzną i zewnętrzną łożyska



Rys. 18. Widmo sygnału akustycznego silnika z uszkodzonymi bieżniami wewnętrzną i zewnętrzną łożyska

transformację FFT sygnału pierwotnego. Na pierwszy rzut oka widać ogromną różnicę między widmami. Widma sygnałów dla silnika zdrowego i z uszkodzeniami są bardzo zbliżone i mało czytelne.

Widmo sygnału pierwotnego zawiera zaledwie trzy dobrze widoczne częstotliwości charakterystyczne $4f_k + 5f_r$, $4f_k + 6f_r$ oraz $4f_k + 7f_r$. Jednak warto zauważyć, że nie wskazują one na uszkodzenie bieżni łożyska, lecz kulek, więc właściwa diagnostyka łożysk przy użyciu FFT jest bardzo trudna, a czasem nawet niemożliwa.

4. Algorytm wykrywania uszkodzeń

Na podstawie badań i oceny skuteczności analiz w wykrywaniu różnego rodzaju uszkodzeń w silnikach indukcyjnych wybrano dwie najskuteczniejsze analizy, z których wyekstrahowano symptomy uszkodzeń. Zebrane symptomy zestawiono w tabeli 2.

W celu właściwej diagnozy badania należy przeprowadzić w możliwie najlepszych warunkach, pozbawionych zewnętrznych zakłóceń. Analiza powinna być przeprowadzona w kolejności:

1. STFT – wybranie krótszych fragmentów nagrania, ok. 5 s, zawierających charakterystyczne symptomy uszkodzeń, np. jak ma to miejsce przy uszkodzeniu kulek łożyska.
2. FFT obwiedni funkcji autokorelacji.
3. Wyszukanie na wykresach końcowych symptomów uszkodzeń według tabeli 1.

5. Podsumowanie

W badaniach użytych zostało wiele analiz sygnałów akustycznych emitowanych przez silniki indukcyjne.

Analiza czasowo-częstotliwościowa wykazała swoją skuteczność w wykrywaniu uszkodzeń jednego oraz dwóch sąsiednich prętów klatki wirnika i przy uszkodzeniach elementów tocznych łożyska. Ponadto niewątpliwą zaletą tej analizy jest to, że spektrogram umożliwia przedstawienie wszystkich składowych częstotliwościowych w czasie, także tych występujących przez krótki czas. Przez to wybór charakterystycznych fragmentów nagrania jest bardzo ułatwiony.

Tabela. 2. Symptomy uszkodzeń silników indukcyjnych w analizach sygnałów akustycznych

Sygnaly charakterystyczne świadczące o uszkodzeniu	STFT	FFT obwiedni ACF
Uszkodzenie		
1 pręt	Pojawienie się sygnału w okolicach 9 kHz	Wzrost amplitudy składowych: $f_r - (f_s - f_b), f_r, 2f_s - 3f_r, 285 \text{ Hz}$
2 pręty	Pojawienie się sygnału w okolicach 9 kHz	Wzrost amplitudy składowych: $f_r - (f_s - f_b), 2f_s - 3f_r, 285 \text{ Hz}$
Pręty 1 i 4	X	Wzrost amplitudy składowych: $f_s - f_b,$ $f_r - (f_s - f_b), 3f_r, 2f_s - 3f_r, 285 \text{ Hz}$
1 kulka	Zakłócenia wysokoczęstotliwościowe występujące okresowo	Wzrost amplitudy składowych: $f_{ko}, \text{ok. } 23,1 \text{ Hz}, f_r, f_k, 3f_r, 4f_k, 12f_r, 9f_k - f_r, 9f_k,$ $9f_k + f_r$
2 kulki	Zakłócenia wysokoczęstotliwościowe występujące okresowo	Wzrost amplitudy składowych: $f_r, 3f_r, 2f_k, 6f_r, 4f_k, 230 \text{ Hz}, 12f_r, 9f_k - f_r, 9f_k$
Bieżnia wewnętrzna	X	Wzrost amplitudy składowych: $f_r, 2f_r, 3f_r, 2f_k, 4f_k, 4f_k + f_r, 3f_{bw} - f_r, 3f_{bw},$ $3f_{bw} + f_r, 403,8 \text{ Hz}, 4f_{bw} + f_r$
Bieżnia zewnętrzna	X	Wzrost amplitudy składowych: $f_{bz} - f_r, 3f_r, f_{bz}, 3f_{bz} - f_r, 3f_{bz}$
Bieżnie zewnętrzna i wewnętrzna	Zakłócenia wysokoczęstotliwościowe w całej długości sygnału	Wzrost amplitudy składowych: $f_r, 2f_r, 3f_r, 4f_k + f_r, 12f_r, 3f_{bw} - f_r, 3f_{bw}, 3f_{bw} + f_r,$ $9f_k - f_r, 9f_k, 9f_k + f_r, 4f_{bw}, 4f_{bw} + f_r$

Najlepszą spośród przeprowadzonych analiz okazała się analiza widma obwiedni funkcji autokorelacji sygnału akustycznego, wykazująca dobrą i bardzo dobrą wykrywalność wszystkich typów uszkodzeń. Wymaga bardziej skomplikowanych i czasochłonnych obliczeń, ale w zamian otrzymujemy przejrzyste widmo pozbawione dużej części szumów i zakłóceń. Analiza ta uwydatnia częstotliwości modulowane przez wyznaczenie obwiedni sygnału. Zastosowanie widma obwiedni ACF umożliwiło wykrycie uszkodzeń łożysk niemożliwe przy innych rodzajach analiz [1]. Pomimo silnych zakłóceń zewnętrznych pochodzących zarówno ze środowiska, jak i urządzeń sprzężonych mechanicznie można z powodzeniem diagnozować silniki indukcyjne, opierając się wyłącznie na sygnałach akustycznych emitowanych przez silnik.

Literatura

- [1] DZWONKOWSKI A.: *Metoda diagnostyki łożysk na podstawie analizy przebiegów prądu i napięcia zasilającego silnik indukcyjny*. Rozprawa doktorska, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011.
- [2] SUŁOWICZ M.: *Diagnostyka silników indukcyjnych metodami sztucznej inteligencji*. Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Kraków 2005.
- [3] PAWLAK M.: *Zastosowanie analiz sygnałów akustycznych do wykrywania uszkodzeń wirników i łożysk w silnikach indukcyjnych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 92/2011.
- [4] CEMPEL C.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN, Warszawa 1989.
- [5] EWERT P., KOWALSKI Cz.T.: *Neuronowy detektor uszkodzeń łożysk tocznych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 92/2011.
- [6] KOSTERA M., SITEK P.: *Systemy akwizycji i przesyłania informacji*. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2002.
- [7] STARCZYŃSKI J.: *Wykrywanie uszkodzeń w silnikach indukcyjnych w oparciu o sygnały akustyczne*. Praca dyplomowa magisterska. Politechnika Krakowska, Kraków 2015.
- [8] KOWALSKI C.T., KANIOR W.: *Ocena skuteczności analiz FFT, STFT i falkowej w wykrywaniu uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 60, Wrocław 2007.
- [9] GŁOWACZ A., GŁOWACZ Z.: *Diagnostics of induction motor based on analysis of acoustic signals with application of FFT and classifier based on words*. Archives of Metallurgy and Materials, 2010 vol. 55, issue. 3, s. 707–712.
- [10] SZYMANIEC S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2013.

Artykuł powstał w wyniku realizacji pracy dyplomowej magisterskiej pt. *Wykrywanie uszkodzeń w silnikach indukcyjnych w oparciu o sygnały akustyczne*. Praca została zrealizowana na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej.

mgr inż. J. Starczyński,
e-mail: jstarczyński@wp.pl;
dr inż. M. Sułowicz,
e-mail: msulowicz@pk.edu.pl;
Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Elektrycznej
i Komputerowej, Instytut
Elektromechanicznych Przemian Energii