

Jarosław Tulicki, Maciej Sułowicz
Politechnika Krakowska, Kraków

ZASTOSOWANIE ANALIZY BISPEKTRALNEJ W DIAGNOSTYCE SILNIKÓW INDUKCYJNYCH KLATKOWYCH

APPLICATION OF THE BISPECTRAL ANALYSIS IN THE DIAGNOSIS OF CAGE INDUCTION MOTORS

Streszczenie: W artykule przedstawiono niezbędne podstawy teoretyczne, wyniki analiz oraz najważniejsze spostrzeżenia i wnioski dotyczące zastosowania transformaty bispektralnej w nieinwazyjnej diagnostyce maszyny indukcyjnej, pracującej w stanie ustalonym. Ocenie poddano efektywność zastosowania bispectrum w analizie sygnałów prądu stojana, napięcia proporcjonalnego do strumienia unipolarnego oraz ciśnienia akustycznego. Obiektem badań był silnik typu Sg112M-4 o mocy 4kW. Do celów pomiarowych zastosowano zmodyfikowane fabrycznie wirniki o różnym poziomie asymetrii elektrycznej. Pomiarów i analizy wykonano dla silnika symetrycznego, silnika z uszkodzonym jednym prętem klatki wirnika, uszkodzeniem dwóch prętów oraz silnika z ekscentrycznością dynamiczną. W artykule zawarto najistotniejsze wyniki obliczeń, odniesione do silnika symetrycznego pracującego przy obciążeniu momentem znamionowym. Analizy numeryczne wykonano za pomocą opracowanych przez autorów funkcji przekształcenia bispektralnego w pakiecie Matlab. Przedstawione wyniki badań dla maszyny z wybranymi typami niesymetrii wirnika, pozwoliły określić przydatność transformaty wyższego rzędu, w rozróżnieniu wybranych uszkodzeń silnika indukcyjnego.

Abstract: The paper presents the knowledge basis, analysis results and the most important observations concerning the application of the bispectral transformation in the non-invasive diagnostic of induction motor under the steady state operation. The effectiveness of the bispectral in an analysis of signals: stator currents, voltage corresponding to the unipolar flux and sound pressure, was assessed. The machine that was researched and numerically analysed was the motor Sg112M-4 of 4kW nominal power. It was investigated on the laboratory test bench under various failure cases and different load. The conducted measurements concern the following cases: symmetrical motor, motor with damaged one rotor bar, two rotor bars and with a dynamic eccentricity. The paper contains the most important analysis results related to the symmetrical motor working with the nominal torque. The analysis was performed with the using of bispectral transformation function prepared in the Matlab software. The presented methodology and the test results of the investigated motor confirmed the method usability in an individual failure distinction of induction motor.

Słowa kluczowe: diagnostyka silnika klatkowego, stany ustalone maszyny indukcyjnej, bispektrum

Keywords: cage motor diagnostics, static states of the induction machine, bispectrum

1. Wstęp

Powszechnie wykorzystywanym typem analizy z zakresu badań przebiegów stacjonarnych w diagnostyce zwartych maszyn indukcyjnych, jest bezpośrednio przekształcenie Fouriera [10]. Za pomocą wymienionej transformaty, następuje wyodrębnienie selektywnych prążków widma częstotliwościowego, stanowiących miarę stanu technicznego [2], [4], [6], [10]. Z procesem dwuwymiarowej transformacji z dziedziny czasu do częstotliwości, wiąże się utrata informacji w formie przesunięć fazowych pomiędzy składowymi widma [12], [13].

W przypadku rzeczywistych sygnałów pomiarowych pochodzących z maszyny indukcyjnej, wszystkie pomiarowo dostępne wielkości fi-

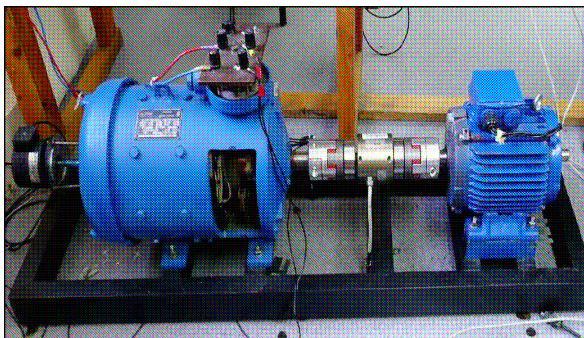
zyczne należy uznać za wygenerowane przez nieliniowy układ dynamiczny [1], [3], [4], [5].

Podstawową cechą powyższych sygnałów, jest występowanie w widmie losowych zakłóceń z dominującym szumem gaussowskim [1], [2], [4]. Eliminację wskazanych zakłóceń na etapie obliczeń, można uzyskać poprzez zastosowanie analizy bispektralnej, opartej na statystykach wyższego rzędu. Prócz tego, wyróżniony typ transformaty nie wykazuje utraty informacji w zakresie przesunięć fazowych [1], [2], [4], [5], [9] z jednoczesnym zachowaniem wartości amplitud.

W artykule przedstawiono wyniki wstępnego studium nad zastosowaniem analizy wyższego rzędu w diagnostyce maszyn indukcyjnych.

2. Układ pomiarowy

Stanowisko laboratoryjne zostało zbudowane z zastosowaniem zwartego silnika indukcyjnego Sg112M-4 o parametrach: $P_N=4,0$ kW, $U_N=380$ V, $I_N=8,6$ A, $n_N=1435$ obr/min. Silnik połączono mechanicznie za pomocą sprzęgła z prądnicą obcowzbudną PZM5545 o danych: $P_N=4,5$ kW, $U_N=230$ V, $I_N=19,6$ A, $n_N=1450$ obr/min oraz $I_w=0,86$ A, stanowiącą obciążenie mechaniczne badanego silnika. Uzwojenia stojana skojarzono w gwiazdę. Silnik zasilono bezpośrednio z sieci niskiego napięcia. Jako wielkości pomiarowe wybrano przebiegi prądu stojana, napięcia proporcjonalnego do strumienia osiowego, ciśnienia akustycznego. Wybrane wielkości fizyczne rejestrowano za pomocą karty pomiarowej NI USB6259 przez okres 10 s, przy częstotliwości próbkowania 10 kS/s na kanał. Do pomiarów prądu stojana zastosowano hallotronowe przetworniki LEM HY 15-P, cewkę pomiarową umieszczoną wewnątrz tarczy łożyskowej silnika po stronie napędowej, a także mikrofon RG-50, którego sygnał napięciowy kondycjonowano za pomocą układu PA-3000. Widok przygotowanego układu napędowego do badań laboratoryjnych przedstawiono na rys.1.



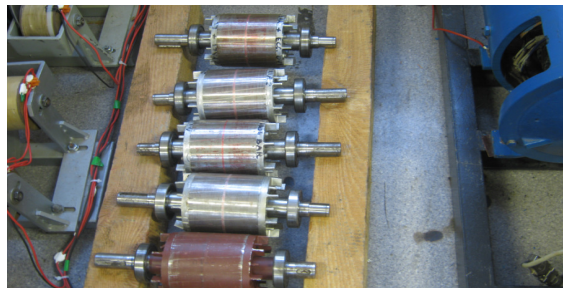
Rys. 1. Widok układu napędowego

W trakcie pomiarów na stanowisku laboratoryjnym dysponowano zmodyfikowanymi fabrycznie wirnikami o różnym stopniu niesymetrii elektrycznej klatki oraz wirnikiem z przesuniętą osią symetrii wału (ekscentryczność dynamiczna).

Wybrany typ uszkodzenia realizowano w wyniku wymiany oraz montażu wewnątrz silnika jednego z wirników ze znaną niesymetrią.

Pomiary wykonano dla silnika symetrycznego, silnika z uszkodzonym jednym prętem klatki wirnika, uszkodzeniem dwóch prętów oraz silnika z zadaną ekscentrycznością dynamiczną.

Na rys. 2 przedstawiono widok zastosowanych wirników do badań laboratoryjnych.



Rys. 2. Widok zastosowanych wirników w czasie badań laboratoryjnych

Podczas badań laboratoryjnych, zarejestrowano sygnały diagnostyczne dla silnika pracującego przy różnych obciążeniach z wybranymi typami asymetrii wirnika. Przedstawione wyniki analiz odniesiono do najbardziej reprezentatywnego przypadku maszyny symetrycznej pracującej z momentem znamionowym.

3. Wprowadzenie do bispectrum

Ogólnie przekształcenie sygnału dyskretnego w bispektrum, można określić jako podwójną szybką transformatę Fouriera wykonaną na rozpatrywanym przebiegu określonej wielkości fizycznej. Pojedynczą operację poszukiwania funkcji bispektrum przedstawia się według poniższego wzoru [2], [9], [14]:

$$B(f_n, f_m) = F(f_n)F(f_m)\overline{F(f_n) + F(f_m)} \quad (1)$$

gdzie:

f_n, f_m - wybrane dyskretne prążki spektrum amplitudowego.

Ostatecznie wynik przekształcenia w dyskretną formę bispektrum, można przedstawić jako uporządkowaną dwuwymiarową tablicę opisaną zależnością (5). Jako częstotliwość centralną przekształcenia, oznaczoną symbolicznie f_c , wybrano podstawową harmoniczną sieci dla przebiegu prądu i strumienia oraz pierwszą częstotliwość rotacji dla przebiegu ciśnienia akustycznego.

4. Częstotliwości diagnostyczne spektrum dwuwymiarowego

Dla przebiegu prądu stojana, podstawowym wskaźnikiem w ocenie stanu klatki wirnika jest wystąpienie składowych widma o odpowiednio wysokiej amplitudzie wokół nieparzystych krotności składowej sieci [4], [10]:

$$f_{sp} = mf_0 | (1 \pm 2s) |, \text{ dla } m=1,3,5... \quad (2)$$

gdzie:

f_{sp} - częstotliwość poślizgowa,

f_0 - częstotliwość sieciowa,

s - poślizg.

W przypadku analizy przebiegu napięcia proporcjonalnego do strumienia osiowego, można wyróżnić składowe związane z asymetrią klatki [4]:

$$f_{spo} = kf_0s \quad (3)$$

gdzie:

f_{spo} - częstotliwość wirnika.

Prócz zależności opisanej wzorem (3), również dla sygnału strumienia osiowego, w stanie sta-

$$\begin{pmatrix} f_1 f_1 \overline{(f_1 + f_1)} & f_1 f_2 \overline{(f_1 + f_2)} & \dots & f_1 f_{n-1} \overline{(f_1 + f_{n-1})} & f_1 f_n \overline{(f_1 + f_n)} \\ f_2 f_1 \overline{(f_2 + f_1)} & f_2 f_2 \overline{(f_2 + f_2)} & \vdots & f_2 f_{n-1} \overline{(f_2 + f_{n-1})} & f_2 f_n \overline{(f_2 + f_n)} \\ f_3 f_1 \overline{(f_3 + f_1)} & f_3 f_2 \overline{(f_3 + f_2)} & f_c f_c \overline{(f_c + f_c)} & \vdots & f_3 f_n \overline{(f_3 + f_n)} \\ f_4 f_1 \overline{(f_4 + f_1)} & f_4 f_2 \overline{(f_4 + f_2)} & \vdots & \vdots & f_4 f_n \overline{(f_4 + f_n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ f_m f_1 \overline{(f_m + f_1)} & f_m f_{n-(n-2)} \overline{(f_m + f_{n-(n-2)})} & \dots & \dots & f_m f_n \overline{(f_m + f_n)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

5. Wyniki analiz

Zobrazowane wyniki obliczeń i analiz uzyskano w wyniku zastosowania okna czasowego Hanninga oraz szybkiej dyskretnej transformaty Fouriera. Moment elektromagnetyczny silnika ustalano za pomocą sygnału napięcia, pochodzącego z momentomierza, liniowo proporcjonalnego do obciążenia. Prąd fazowy stojana wynosił 4 A, przy prędkości obwodowej 1430 obr/min. Wykresy przedstawiono w skali decybelowej w odniesieniu do podstawowej (centralnej) harmonicznej spektrum. Rozdzielczość widm wynosi 0,5 Hz.

5.1. Sygnał prądu fazowego stojana

Najczęściej stosowanym sygnałem w ocenie stanu asymetrii elektrycznej klatki wirnika, jest przebieg prądu stojana. Jak wykazano [4], [10], wyodrębnienie częstotliwości diagnostycznych opisanych wg (2), z tła pozostałych składowych użytecznych i szumu nie wykazuje znacznych trudności dla momentów obciążenia większych od połowy wartości momentu znamionowego. Najistotniejszym z ograniczeń w zastosowaniu sygnału prądu, jest właściwy wybór warunków

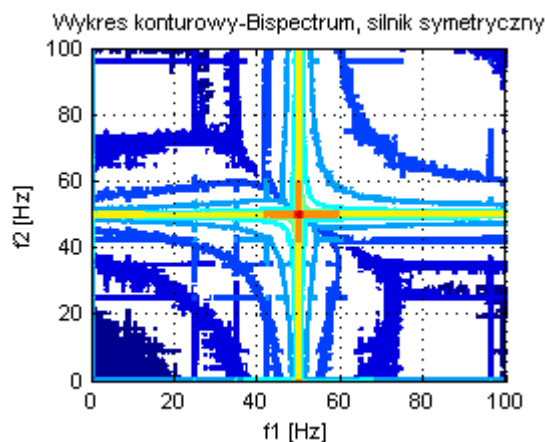
rejestracji przebiegu, od których uzależniona jest czytelność widma dla wybranych częstotliwości wokół składowej podstawowej. Dla przypadku wysokiej rozdzielczości analizy spektralnej, poniżej 1 Hz, wpływ sygnałów nieużytecznych na czytelność widma jest minimalny [4], [10].

$$f_k = 2mf_0(1 \pm s), \text{ dla } m=1,2,3\dots \quad (4)$$

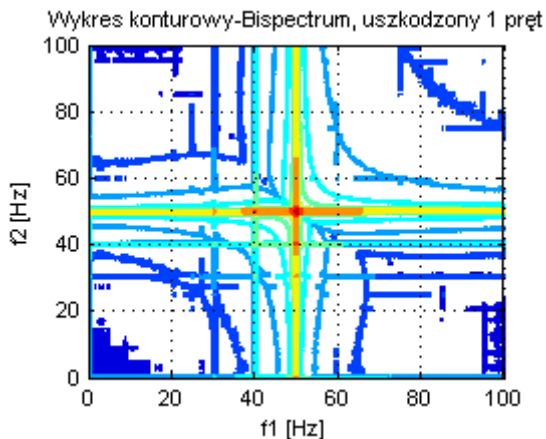
gdzie:

f_k - częstotliwość związana z niesymetrią klatki wirnika.

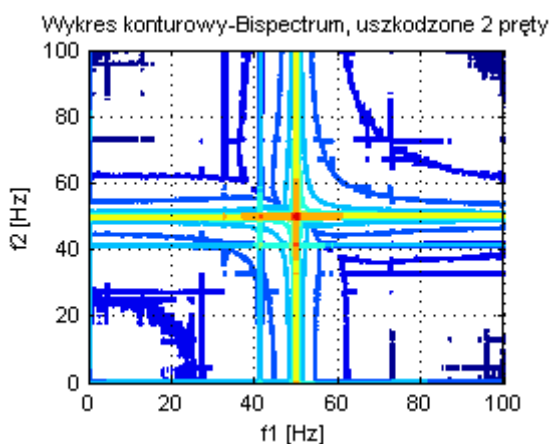
Na rys.3 do rys.7 przedstawiono efekt zastosowania przekształcenia bispektralnego, do sygnału prądu stojana.



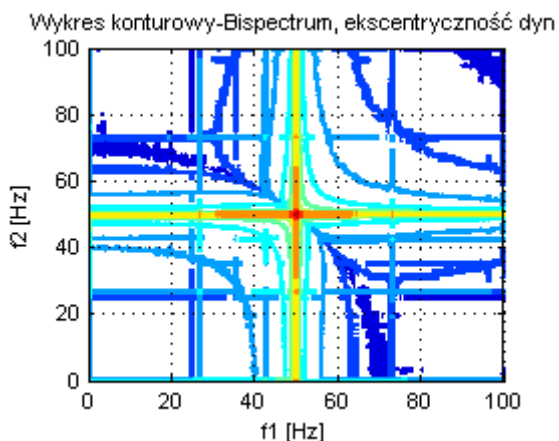
Rys. 3. Wykres konturowy, silnik z symetrycznym wirnikiem, sygnał prądu



Rys. 4. Wykres konturowy, silnik z uszkodzonym pojedynczym prętem klatki, sygnał prądu



Rys. 5. Wykres konturowy, silnik z uszkodzonymi dwoma prętami klatki, sygnał prądu



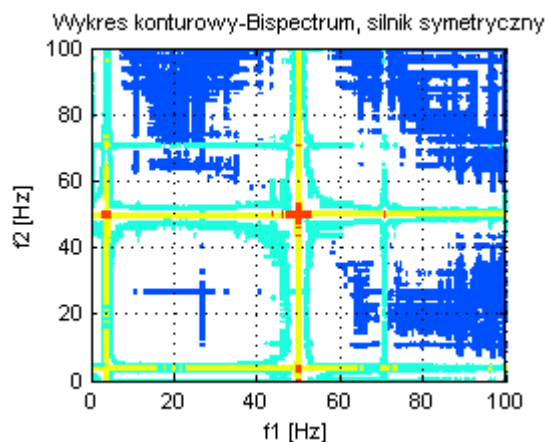
Rys. 6. Wykres konturowy, silnik z dynamicznym przesunięciem osi wirnika, sygnał prądu

Według wykresów konturowych z rys.3 do rys.6 wskazanie składowej sieci o charakterze częstotliwości centralnej polispektrum na tle sygnałów nieużytecznych, należy uznać za jednoznaczne. Dla silnika symetrycznego oraz silnika z dowolną asymetrią klatki wirnika, można zaobserwować składowe przedstawione

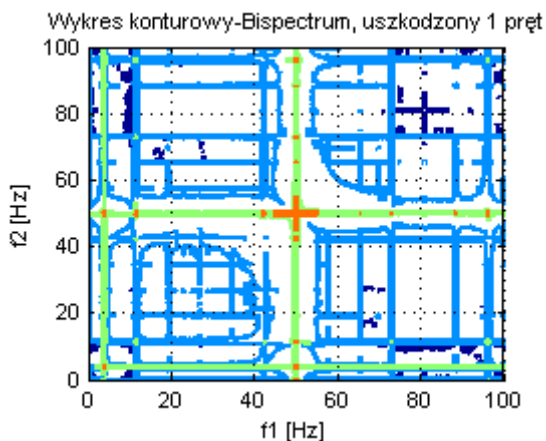
wzorem (2). Podobnie jak dla typowego widma dwuwymiarowego, odróżnienie dynamicznego przesunięcia osi wirnika od uszkodzenia klatki wirnika w zakresie częstotliwości $0 \div 100$ Hz jest ograniczone. Obserwacja różnic oraz sum częstotliwości podstawowej i rotacyjnej oraz kombinacji składowej poślizgowej, wykazuje jedynie symetryczne odbicia częstotliwości z głównej osi bispektrum, w I i III ćwiartce obszaru rozwiązania. Wskazane kombinacje sygnałów diagnostycznych, wykazują znaczną regularność dla asymetrii wirnika bez względu na rodzaj oraz poziom uszkodzenia. Niemniej jednak, dodatkowe składowe nie wnoszą istotnych informacji mogących w jednoznaczny sposób wykazać wyższość zastosowania bispektrum nad widmem dwuwymiarowym dla sygnału prądu stojana.

5.2. Sygnał napięcia wprost proporcjonalnego do strumienia poosiowego

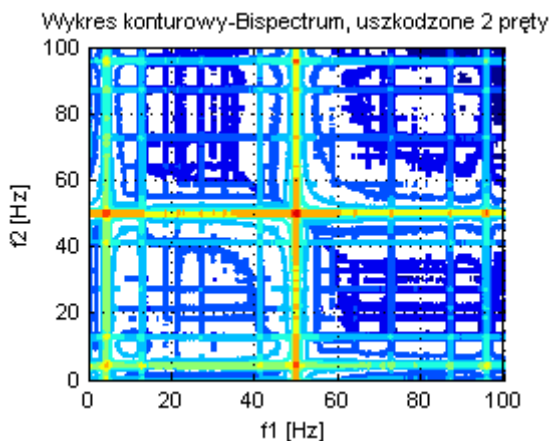
Sygnał strumienia poosiowego w odróżnieniu od przebiegu prądu stojana, pozwala jedynie na wyróżnienie asymetrii elektrycznych w postaci uszkodzenia stojana oraz wirnika. Można więc uznać, że sygnał strumienia unipolarnego nie wykazuje nadmiarowości w formie składowych będących wynikiem asymetrii mechanicznych. Prócz powyższego, strumień osiowy wyrażony w postaci przebiegu pochodnej napięcia będącego efektem pośredniego pomiaru strumienia [4], oznacza się nieznacznymi różnicami wartości amplitudy harmonicznej sieci do pozostałych składowych użytecznych. Przykładowe wyniki obliczeń dla opracowanego algorytmu i wybranych typów asymetrii wirnika, przedstawiono na rys.7 do rys.11.



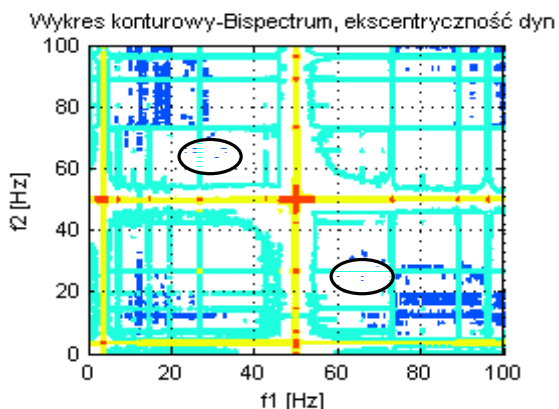
Rys. 7. Wykres konturowy, silnik z symetrycznym wirnikiem, napięcie wprost proporcjonalne do pochodnej strumienia poosiowego



Rys. 8. Wykres konturowy, silnik z uszkodzonym pojedynczym prętem, napięcie proporcjonalne do pochodnej strumienia poosiowego



Rys. 9. Wykres konturowy, silnik z uszkodzonymi dwoma prętami, napięcie proporcjonalne do pochodnej strumienia poosiowego



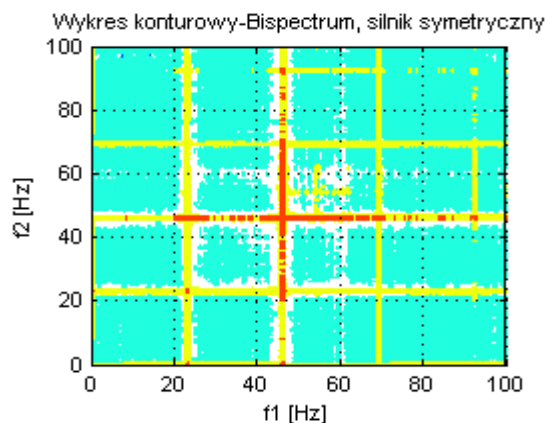
Rys. 10. Wykres konturowy, silnik z wirnikiem o dynamicznym przesunięciu osi, napięcie proporcjonalne do pochodnej strumienia poosiowego

Podobnie jak dla przebiegu prądu stojana, w przypadku napięcia wprost proporcjonalnego do pochodnej strumienia unipolarnego, obserwuje się składowe, wykazujące bezpośrednią

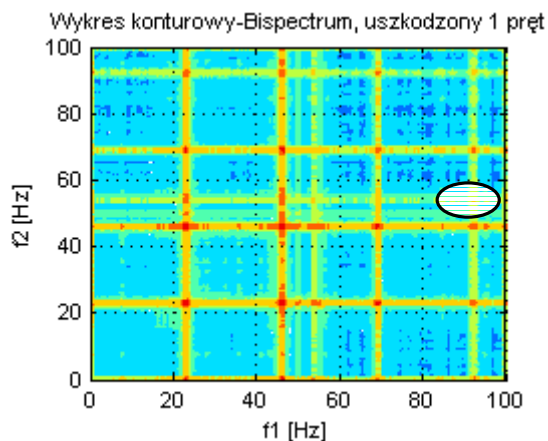
zbieżność ze spektrum jednowymiarowym dla tej samej wielkości pomiarowej. Określenie procesów związanych z definicją kwadratowego sprężenia fazowego [4], [11] oraz przyjętym modelem maszyny jako obiektu nieliniowego, w postaci wzajemnych sprężeń sygnałów o charakterze diagnostycznym jest znacznie ograniczone do widocznych symetrycznych odbić składowych na płaszczyźnie rozwiązania. Dla przypadku uszkodzenia prętów klatki wirnika, rozszerzenie analizy do kombinacji sygnałów wg (2) oraz (3) i składowej sieciowej jest nieefektywne, ze względu na jednoznaczny charakter składowych w widmie dwuwymiarowym. Dla niesymetrii spowodowanej ekscentrycznością dynamiczną, można wyróżnić kombinacje częstotliwości wirnika i sieci, w I i III ćwiartce powierzchni rozwiązania. Wskazane składowe wykazują również korelacje ze składowymi będącymi wynikiem uszkodzenia obwodu klatki wirnika, identycznie jak dla widma dwuwymiarowego.

5.3. Sygnał ciśnienia akustycznego

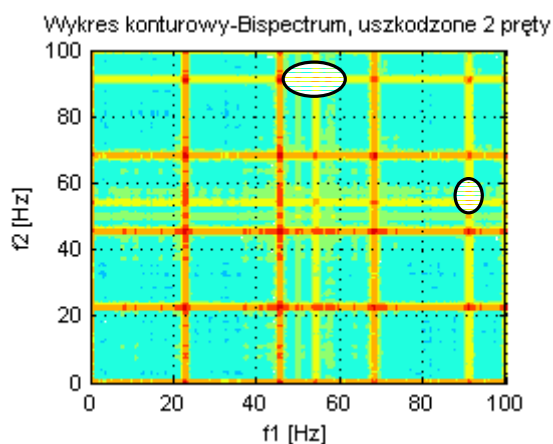
Sygnałem szczególnie podatnym na zakłócenia wewnętrzne i zewnętrzne, będące bezpośrednim wynikiem budowy przetworników ciśnienia akustycznego na napięcie oraz wzajemnych sprężeń elektromagnetycznych, jest sygnał wibroakustyczny. Zgodnie z charakterystyką przekształcenia bispektralnego, efektywność zastosowania przyjętej transformaty przyjmuje wyjątkowe znaczenie dla wielkości, gdzie odstęp sygnału użytecznego od szumu jest nieznaczny. Potwierdzeniem wskazanej wyżej charakterystyki przekształcenia, są wyniki dla analizy sygnału akustycznego, zestawione na rys. 11 do rys.14, w odniesieniu do składowej podstawowej rotacji.



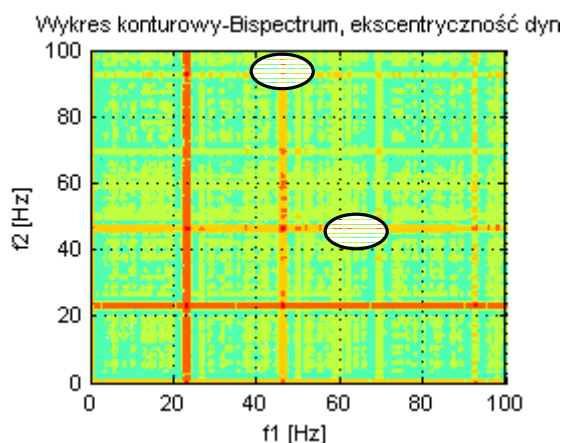
Rys. 11. Wykres konturowy, silnik z symetrycznym wirnikiem, ciśnienie akustyczne



Rys. 12. Wykres konturowy, uszkodzony pojedynczy pręt klatki, ciśnienie akustyczne



Rys. 13. Wykres konturowy, uszkodzone dwa pręty klatki, ciśnienie akustyczne



Rys. 14. Wykres konturowy, ekscentryczność dynamiczna, ciśnienie akustyczne

Dla silnika z niesymetrią obwodu wirnika, wskazanie bezpośrednich składowych wg (4) związanych z uszkodzeniem, podobnie jak dla widma dwuwymiarowego wokół składowych rotacji może być utrudnione. Niemniej, na tle szumu istnieją łatwo rozróżnialne składowe, będące wynikiem wzajemnych sprzężeń między

sygnałami diagnostycznymi i harmonicznymi rotacji w wyniku występujących niesymetrii wirnika. Dla przypadku niesymetrii wirnika, spowodowanej zerwaniem prętów, obserwuje się składowe wprost wynikające z formuły (2), wokół składowej sieci, co nie jest jednoznaczne dla widma dwuwymiarowego rozpatrywanej wielkości. Również dla asymetrii wynikającej z dynamicznego przesunięcia osi symetrii wirnika, wyróżnienie składowych opisanych wzorem (4) oraz kombinacji ze składową rotacji z tła pozostałych częstotliwości, wykazuje istotne różnice, w porównaniu z bezpośrednim przekształceniem Fouriera.

6. Wnioski końcowe

W artykule przedstawiono wstępne studium nad możliwością zastosowania przekształcenia wyższego rzędu w diagnostyce zwartego silnika indukcyjnego, pracującego w stanie ustalonym. Na podstawie uzyskanych wyników analiz dla maszyny z wybranymi typami niesymetrii wirnika, wyróżnienie składowych w postaci opisanych częstotliwości w rozdziale 4 dla sygnałów prądu i strumienia osiowego, należy uznać za jednoznaczne.

Jak wykazano w podpunkcie 5.3, bezpośrednio wskazanie składowych związanych z asymetrią obwodu wirnika wokół składowych rotacji dla sygnału akustycznego, jest stosunkowo łatwe do wyróżnienia. Dodatkowo prócz składowych wynikających z (2) i (4), obserwuje się nowe częstotliwości będące wynikiem sum i różnic składowych związanych z danym typem uszkodzenia i rotacji. Generując tym samym nowe składniki trójwymiarowego spektrum, pozwalające na poprawną ocenę stanu badanej maszyny.

Podsumowując, zastosowanie bispektrum do przebiegu prądu lub do pośredniego sygnału strumienia osiowego w przypadku asymetrii elektrycznej wirnika, nie przynosi dodatkowych korzyści w porównaniu z przekształceniem dwuwymiarowym. Odmienne kształtuje się przypadek dla sygnału akustycznego, gdzie różnice amplitud składowych użytecznych do szumu są nieznaczne, a przekształcenie sygnału w bispektrum pozwala na zdecydowaną poprawę czytelności zawartych składowych w przebiegu.

Analiza bispektralna, pomimo wymienionych pozytywnych cech, posiada również istotne wady w postaci wydłużonej procedury obliczeń wraz ze zwiększaniem rozdzielczości widma,

która ogranicza zastosowanie przekształcenia wyższego rzędu do analizy off-line.

Przedstawione w artykule analizy przebiegów prądu i strumienia dotyczyły silnika zasilanego z sieci sztywnej, gdzie wpływ składowych nie biorących udziału w procesie diagnostyki jest minimalny. Według zgromadzonej dotychczas wiedzy, analiza przebiegów prądu stojana oraz strumienia poosiowego, maszyny klatkowej zasilanej z układów przekształtnikowych jest utrudniona ze względu na nieskończone widmo wyższych harmonicznnych, co sprawia że dalsze prace nad rozwojem analizy trzeciego rzędu powinny być ukierunkowane na przypadki napędów zasilanych z falowników. Równie istotnym zagadnieniem jest wynikowa tablica bispektrum dla silnika z występującymi łącznie niesymetriami stojana i wirnika oraz możliwość zastosowania przekształcenia czwartego rzędu w postaci trispektrum.

7. Literatura

- [1]. Alwodai A., Wang T., Chen Z., Gu F., Cattley R., Ball A.: *A Study of Motor Bearing Fault Diagnosis using Modulation Signal Bispectrum Analysis of Motor Current Signals*. Journal of Signal and Information Processing, 2013, 4, 72-79.
- [2]. Cempel C.: *Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn*. WNT Warszawa 1982.
- [3]. Gu F., Shao Y., Hu N., Fazenda B., Ball A.: *Motor Current Signal Analysis using a Modified Bispectrum for Machine Fault Diagnosis*. National Natural Science Foundation of China.
- [4]. Kowalski C. T.: *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [5]. Liang Bo., Iwnicki S., Zhao Y.: *Application of Power Spectrum, Cepstrum, Higher Order Spectrum and Neural Network Analyses for Induction Motor Fault Diagnosis*. University of Huddersfield Repository.
- [6]. Negrea M.: *Fault Diagnostics of Electrical AC Machine*. Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics.
- [7]. Osowski S., Cichocki A., Siwek K.: *Matlab w zastosowaniu do obliczeń obwodowych i przetwarzania sygnałów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2006.
- [8]. Radkowski S., Zawisza M.: *Use of bispectral analysis in prognosis of the system destruction process*. Politechnika Warszawska, Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn 2009.
- [9]. Sondergaard S. R., Sorensen M. B.: *Real-time Blind Source Separation*. Aalborg University Institute for Electronic Systems, Spring 2009.
- [10]. Swędrowski L.: *Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
- [11]. Treerong J.: *Fault Detection and Diagnosis of Induction Motors Based on Higher-Order Spectrum*. IMECS Vol II Hong Kong 2010.
- [12]. Tumański S.: *Technika Pomiarowa*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne 2007.
- [13]. Zieliński T.J.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2007.
- [14]. Żółtowski B., Łukasiewicz M., Kałaczyński T.: *Techniki informatyczne w badaniach stanu maszyn*. Wydawnictwo Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2012.

Autorzy

mgr inż. J. Tulicki, jtulicki@pk.edu.pl
 dr inż. M. Sułowicz, msulowicz@pk.edu.pl
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii,
 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24