

MIECZYŚLAW ZAJĄC*

MONITOROWANIE UKŁADU
ELEKTROMECHANICZNEGO METODĄ ANALIZY
CZASOWO-CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJMONITORING OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM
USING TIME-FREQUENCY ANALYSIS

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań efektywności zastosowania analizy falkowej i transformacji Wignera-Ville'a w monitorowaniu stanów typowych członów napędu prądu przemiennego. Jako przykład wykorzystano napęd przekształtnikowy składający się z falownika napięcia zasilającego silnik indukcyjny klatkowy, a także złożone obciążenie mechaniczne. Zbadano wpływ poziomu dekompozycji i doboru kształtu falki podstawowej oraz wpływ doboru przedziału czasowego metody Wignera-Ville'a na czułość wykrywania uszkodzeń i efektywność wnioskowania diagnostycznego.

Słowa kluczowe: diagnostyka techniczna, analiza falkowa, transformacja Wignera-Ville'a, układy elektromechaniczne

Abstract

The paper presents the investigation results of the effectiveness of applying wavelet methods and the Wigner-Ville transformation in states monitoring of typical elements of the AC drive. As an example the electric drive system consist of the voltage inverter powering the squirrel-cage induction motor was showed. A case of complex mechanical load was also investigated. An influence of the decomposition level and the selection of the basic wavelet shape as well as an influence of the selection of the time period of the Wigner-Ville method on the faults detection sensitivity and the effectiveness of the diagnostic inference were examined.

Keywords: technical diagnostics, wavelet analysis, Wigner-Ville transformation, electromechanical systems

* Dr hab. inż. Mieczysław Zajac, Katedra Automatyki i Technik Informatycznych, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Pojawiające się symptomy uszkodzeń parametrycznych układów elektromechanicznych mogą być trudne do wykrycia i zlokalizowania głównie ze względu na niewielkie zmiany wartości amplitud składowych sygnału i niestacjonarność procesów. Diagnostowanie procesów niestacjonarnych wymaga zastosowania odmiennego aparatu badawczego w porównaniu z metodami diagnozowania sygnałów stacjonarnych [10]. Dla procesów niestacjonarnych należy wybierać zbiory funkcji bazowych pozwalających na badanie właściwości widmowych przy jednoczesnym zapewnieniu dobrej lokalizacji czasowej, co zapewnia analiza czasowo-częstotliwościowa. Można w tym miejscu wymienić przykłady wykorzystania analiz czasowo-częstotliwościowych w diagnostyce drganiowej turbin wiatrowych [4], układów napędowych [1], maszyn elektrycznych [3], czy też urządzeń energoelektronicznych [7]. W diagnostyce procesów mamy często do czynienia ze sprzężonym układem automatycznego sterowania [12]. Aktualnie prowadzone są prace nad systemami tolerującymi uszkodzenia [11].

Zastosowanie metod analizy czasowo-częstotliwościowej z wielostopniową dekompozycją sygnału i zmienną rozdzielczością ułatwia wczesne wykrywanie narastających uszkodzeń, co pokazał autor w pracy [15], wykorzystując informacje zawarte w rozkładzie współczynników falkowych złożonego układu elektromechanicznego. W pracy [14] autor zaprezentował metodę, w której do generacji falkowych funkcji bazowych użył skalowanych funkcji analizujących, których kształt dobierał na podstawie charakteru przebiegu czasowego sygnału skojarzonego z uszkodzeniem. W wykonanych pod kierunkiem autora pracach dyplomowych [6 i 7] przedstawiono odpowiednio wyniki badań analizy sygnałów masowo-sprężystego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem przekształcenia Wignera-Ville'a i wyniki badań sygnałów napędu przekształtnikowego przy skokowych zmianach parametrów falownika i zastosowaniu transformacji falkowej.

Artykuł ma na celu pokazanie na kilku przykładach, że możliwe jest skonstruowanie automatycznego systemu diagnostycznego dla typowego układu elektromechanicznego zbudowanego z wykorzystaniem metod czasowo-częstotliwościowych: przekształcenia falkowego lub przekształcenia Wignera Ville'a. Analiza rozkładów czasowo-częstotliwościowych powinna ułatwiać nadzór operatorski i w istotny sposób pomagać w podejmowaniu decyzji w przypadku pojawienia się pierwszych symptomów uszkodzenia. Autor starał się wykazać, że skuteczność tej metody zależy od właściwego doboru kształtu funkcji bazowych i pasma częstotliwości. Wystąpienie w sygnale niewielkich, ale charakterystycznych dla danego uszkodzenia składowych lub nieciągłości powinno skutkować zmianą wartości pewnego ograniczonego zbioru współczynników rozkładu tego sygnału, takich jak np. pewien zbiór współczynników rozwinięcia falkowego czy też reprezentacja przekształcenia Wignera-Ville'a. Wykorzystanie tego zjawiska w diagnostyce uzależnione jest od ustalenia, które ze współczynników rozwinięć skojarzone są z poszczególnymi rodzajami uszkodzeń.

Praca została wykonana w Katedrze Automatyki i Technik Informacyjnych Politechniki Krakowskiej.

2. Modele sygnałowe

W literaturze [12] wyróżnia się trzy fazy diagnozowania stanu układu dynamicznego:

- wykrywanie uszkodzenia – obejmujące zauważenie jego pojawienia się w pewnym czasie,
- lokalizację uszkodzenia – obejmującą określenie rodzaju i miejsca jego pojawienia się,
- identyfikację uszkodzenia – polegającą na określeniu rozmiaru i charakteru jego zmienności.

Pojęcie diagnostyki uszkodzenia obejmuje działanie łączące wykrywanie, lokalizację i identyfikację. Przedstawione w tym artykule metody odnoszą się do tak rozumianego pojęcia.

Metody cyfrowe ułatwiają wyodrębnianie krótkoczasowych cech analizowanych sygnałów, co czyni bardziej skutecznym wykrywanie uszkodzeń w przypadku badania układów niestacjonarnych. Układy elektromechaniczne zasilane z przekształtników energoelektronicznych generują, szczególnie w stanach nieustalonych, szerokie widmo harmonicznym, a także interharmonicznym, które obniżają jakość napięcia zasilającego i niezawodność oraz zwiększają straty energii. Do identyfikacji stanów układów elektromechanicznych zastosowano podejście oparte na wykorzystaniu wybranych metod analizy czasowo-częstotliwościowej: analizy falkowej i przekształcenia Wignera-Ville'a.

Przyjmując, że podstawą wnioskowania diagnostycznego są informacje zawarte w sygnałach występujących w układzie elektromechanicznym, istotnym problemem staje się wyodrębnienie i wykorzystanie tych informacji. Sygnały powinny być w tym celu poddawane analizie jednocześnie w dziedzinie czasu i częstotliwości, co ułatwia interpretację różnorodnych stanów układu. Każdemu sygnałowi można przyporządkować pewien model określający charakter i sposób jego analizy. Dla sygnałów niestacjonarnych należy wybierać modele o zbiorach funkcji bazowych charakteryzujących się dobrą lokalizacją czasową, czyli o selektywnym nośniku. Klasyfikacja sygnałów w dziedzinie częstotliwości oparta jest na zastosowaniu metod transformacyjnych pozwalających badać jego właściwości widmowe.

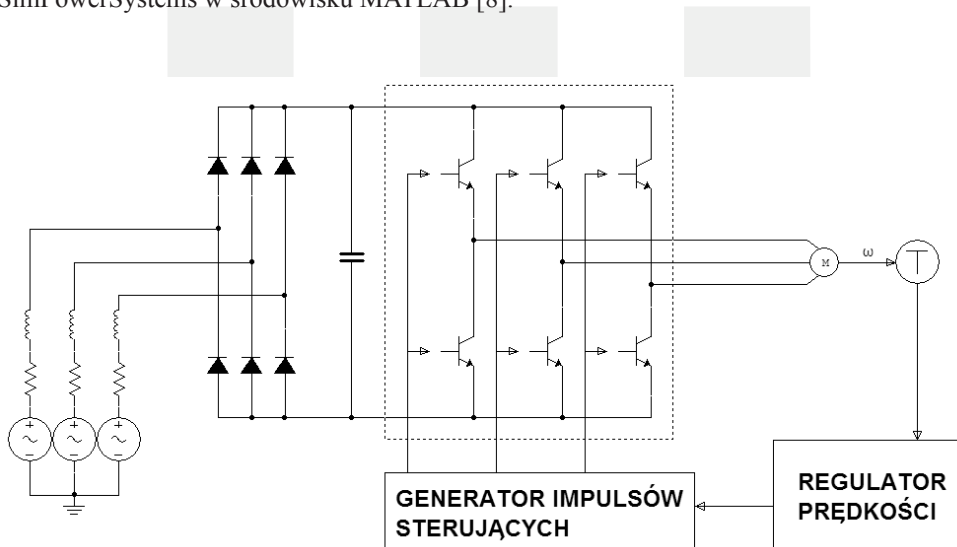
W analizie falkowej badany sygnał przedstawia się za pomocą kombinacji liniowej pewnych bazowych sygnałów elementarnych, zazwyczaj wzajemnie ortogonalnych. Ważnym problemem jest minimalizacja modelu sygnałowego polegająca na właściwym dopasowaniu kształtu funkcji bazowych do analizowanego sygnału i doborze właściwego poziomu dekompozycji. Ma to na celu zminimalizowanie liczności zbioru istotnych współczynników rozwinięcia, co ułatwia proces diagnozowania [14].

Problem poprawnego doboru okna analizy w dużym stopniu rozwiązuje zastosowanie transformacji Wignera-Ville'a, dla której rozmiar okna jest dobierany adaptacyjnie na podstawie cech badanego sygnału. Charakteryzuje się ona dużą koncentracją energii w przestrzeni czasowo-częstotliwościowej, co jest związane z dobrą zdolnością rozdzielczą. Zapewnia dobrą jakość reprezentacji sygnałów w porównaniu z innymi metodami analizy czasowo-częstotliwościowej. Zalety te uwidaczniają się przy analizie sygnałów o liniowej modulacji częstotliwości, dla sygnałów o innym rodzaju modulacji lub sygnałów złożonych występują pasywnicze interferencje wzajemne, które utrudniają interpretację uzyskanych wyników. Interferencje te są wynikiem nieliniowości przekształcenia, która jest skutkiem operacji mnożenia sygnału przez ten sam sygnał odwrócony w czasie. Lokalne wygładzanie widma w reprezentacji Wignera-Ville'a pozwala na eliminację pasywniczych interferencji, lecz obniża dokładność odwzorowania.

3. Przykłady wykrywanie zmian wartości parametrów układu elektromechanicznego

3.1. Wykorzystanie analizy falkowej do wykrywanie zmian parametrów falownika

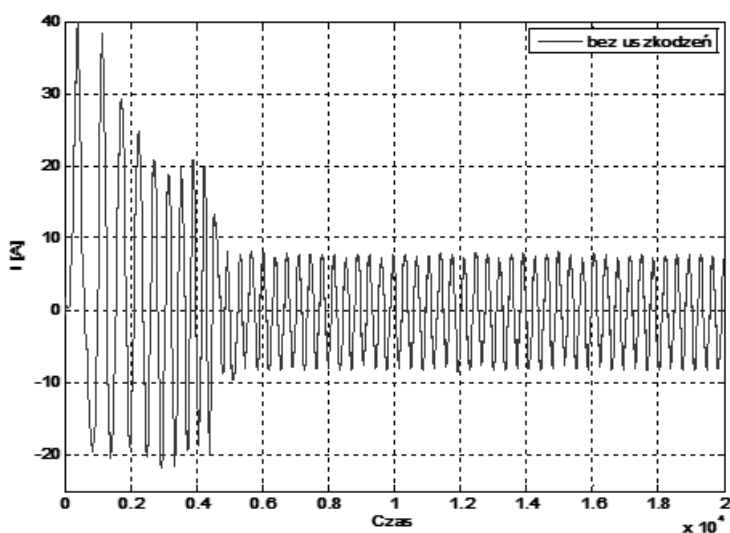
W pracy [7] omówiono skutki występowania uszkodzeń falownika, analizując ich wpływ na dynamikę silnika. Wykazano, że uszkodzenia tranzystorów mocy są przyczyną trwałej degeneracji układu napędowego, wykluczając go z dalszej pracy. Ważne jest więc monitorowanie nawet niewielkich fluktuacji parametrów układu i sieci zasilającej, mogących w wyniku wystąpienia niekorzystnych zjawisk stać się przyczyną uszkodzeń elementów półprzewodnikowych. W Katedrze Automatyki Politechniki Krakowskiej wykorzystano do badań model napędu przekształtnikowego zrealizowany za pomocą elementów biblioteki SimPowerSystems w środowisku MATLAB [8].



Rys. 1. Model badanego napędu

Fig. 1. The model of electric drive

Prostownik niesterowany zasilany jest trójfazowym układem napięć symetrycznych. Prostownik zasila układ falownika napięcia, który zbudowany jest z tranzystorów IGBT z dołączoną diodą zwrotną. Przyjęto, że rezystancja w stanie przewodzenia tranzystora wynosi 1 mΩ. Przekształtnik zasila silnik indukcyjny klatkowy o następujących parametrach: moc znamionowa: $P_N = 2,3$ kW, napięcie znamionowe: $U_N = 400$ V/50 Hz, rezystancja fazy stojana: $R_s = 0,435$ Ω, indukcyjność fazy stojana: $L_s' = 0,005$ H, rezystancja wirnika: $R_w' = 0,816$ Ω, indukcyjność wirnika: $L_w' = 0,002$ H, indukcyjność wzajemna: $L_m = 0,07$ H, moment bezwładności wirnika: $J = 0,089$ kg·m², moment obciążenia silnika 5 Nm. Wykorzystując regulator prędkości typu PI działający w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego z uwzględnieniem kompensacji poślizgu oraz modulator wektora napięcia zastosowano układ regulacji realizujący sterowanie skalarne metodą $u/f = \text{const}$. Układ generujący impulsy podawane na bramki tranzystorów działa w oparciu o modulację wektorową.



Rys. 2. Przebieg prądu fazowego silnika

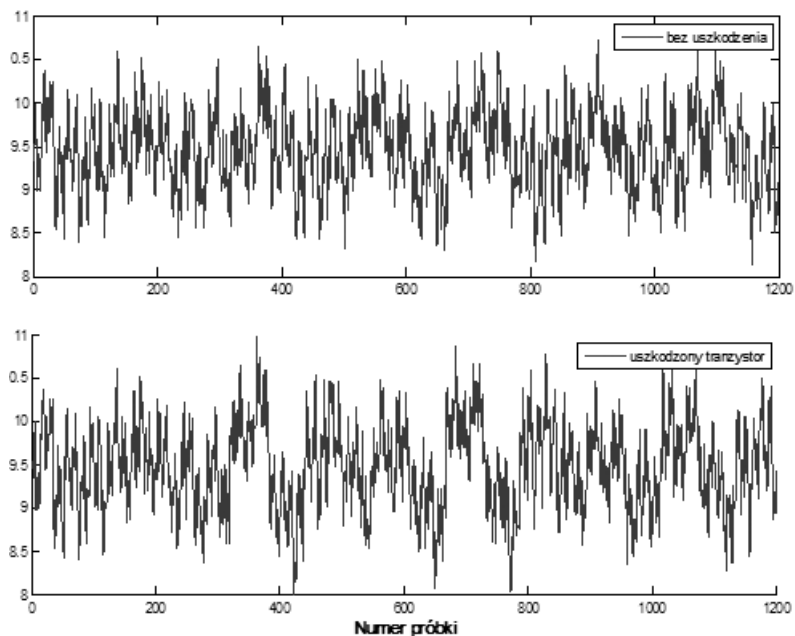
Fig. 2. The current waveforms of induction machine

Jako przykłady zmian parametrów układu i sieci zasilającej podlegające procedurze identyfikacyjnej przyjęto występujące w chwili 0,95 s: skokowy wzrost rezystancji (o $2\text{ m}\Omega$) w obwodzie w stanie przewodzenia jednego z tranzystorów oraz spadek napięcia w jednej z faz sieci zasilającej odpowiadający obniżeniu amplitudy sygnału sterującego źródłem napięciowym o wartości 35 V. Badaniom poddano wygenerowane symulacyjnie przebiegi prądu fazowego silnika. Przebieg taki dla układu bez zmian parametrów przedstawiono na rys. 2. Sygnały były próbkowane z częstotliwością 10 kHz. Całkowity czas symulacji wynosił 2 sekundy, co odpowiada 20 tysiącom elementów uzyskanych szeregów czasowych. Oś czasu wyskalowana jest numerem próbki.

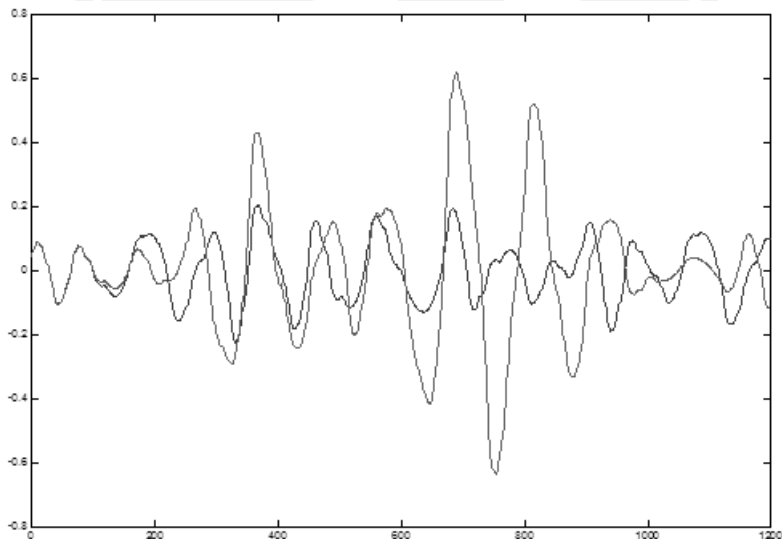
Następnie przeprowadzono symulacje w układzie z występującą skokowo zmianą parametrów obwodu tranzystora i sieci zasilającej. W dziedzinie czasu przebiegi we wszystkich trzech badanych przypadkach przyjmują w przyjętej skali niemal identyczną, trudną do rozróżnienia, formę. Dlatego ograniczono się do zilustrowania przebiegu układu bez uszkodzeń.

Nieco więcej informacji o wystąpieniu skokowych zmian parametrów obwodu tranzystora mocy i sieci zasilającej daje analiza przebiegu sygnału wirującego wektora prądu stojana przy częstotliwości próbkowania 2 kHz. Czas symulacji wyniósł w tym przypadku 1,2 sekundy, a czas pojawienia się zaburzenia ustalono na 0,95 sekundy. Sygnał zaczęto mierzyć po upływie 0,6 sekundy, po osiągnięciu przez silnik stanu ustalonego. Ilustrację na rys. 3 ograniczono do przypadku skokowej zmiany rezystancji w obwodzie tranzystora.

Wykrywanie opisanych skokowych zmian na podstawie analizy przebiegu modułu wirującego wektora prądu może być przeprowadzone z zastosowaniem analizy falkowej. Na podstawie wyników oszacowania pseudo-częstotliwości składowych sygnału modułu wirującego wektora prądu, związanych z wprowadzonymi zmianami skokowymi parametrów obwodu tranzystora, i porównania z tym oszacowaniem częstotliwości środkowych falek



Rys. 3. Przebieg modułu wirującego wektora prądu silnika
 Fig. 3. The absolute value of machine current vector waveforms



Rys. 4. Porównanie detali na 6/7 poziomie dekompozycji

Fig. 4. Comparison of the detail coefficients on the 6/7 decomposition level

używanych do przeprowadzenia analizy, można dokonać wyboru rodzaju i rzędu falki analizującej oraz poziomu dekompozycji [14].

Do przeprowadzenia analizy przebiegu modułu wirującego wektora prądu wybrano falke db4 i szósty z siedmiu poziom dekompozycji. Odpowiadające temu przypadkowi przebiegi detali, które mogą stanowić dobrą podstawę dla realizacji detekcji uszkodzeń zobrazowano na rys. 4. Linia grubszą oznaczono stan bez uszkodzenia, natomiast linią cieńszą oznaczono przypadek skokowej zmiany rezystancji.

Dla ilościowego porównania i wyodrębnienia najbardziej użytecznych poziomów dekompozycji można użyć różnego rodzaju wskaźników, na przykład metody analizy porównawczej, polegającej na badaniu wartości statystycznych przebiegów zrekonstruowanych aproksymacji i detali, takich jak wartości średnie, odchylenie standardowe czy mediana. Użytecznym wskaźnikiem może być też energia własna przypisana do kolejnego węzła dekompozycji [3, 5]. Energię tę można obliczyć wykorzystując zależność:

$$E_j = \sum_{k=1}^n |S_{j,k}|^2 \quad (1)$$

gdzie:

$S_{j,k}$ – odpowiednie współczynniki dyskretnej transformaty falkowej,
 j, k – odpowiednio parametry skali i przesunięcia.

W celu wyznaczenia wszystkich wymienionych wyżej danych statystycznych można użyć zaimplementowanego w programie MATLAB pakietu o nazwie *Wavelet Toolbox*. Według wiedzy autora nie istnieje uniwersalny wskaźnik, pozwalający na dokonywanie użytecznego wyboru detali pod kątem celowości ich wykorzystania w procesie wnioskowania diagnostycznego. W badaniach układów elektromechanicznych dobre wyniki daje często zastosowanie wskaźnika energetycznego [4, 9].

W tabeli 1 podano rozkład energii własnej poszczególnych detali zdekomponowanego sygnału modułu wirującego wektora prądu silnika indukcyjnego pracującego w badanym układzie napędowym.

Tabela 1

Rozkład energii własnej detali modułu wirującego wektora prądu

	Normalny stan pracy	Skok wartości rezystancji
Aproksymacja sygnału	99,9569	99,9464
Detal na poziomie 1	0,0039	0,0039
Detal na poziomie 2	0,0070	0,0069
Detal na poziomie 3	0,0085	0,0092
Detal na poziomie 4	0,0055	0,0053
Detal na poziomie 5	0,0082	0,0084
Detal na poziomie 6	0,0031	0,0116
Detal na poziomie 7	0,0069	0,0083

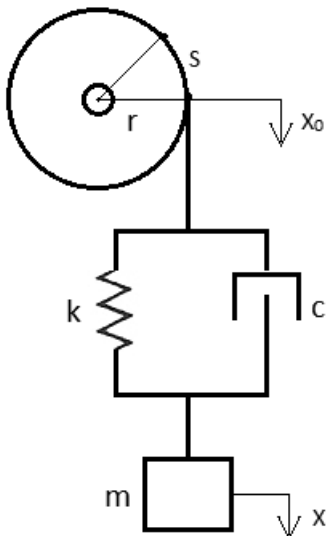
Różnica energii własnej detalu modułu wirującego wektora prądu na szóstym poziomie dekompozycji potwierdza dokonany uprzednio wybór.

3.2. Wykrywanie zmian niewielkiego skokowego spadku rezystancji stojana z wykorzystaniem przekształcenia Wignera-Ville'a

Dla zilustrowania możliwości zastosowania przekształcenia Wignera-Ville'a w procesie wykrywania uszkodzeń posłużono się przykładem przejściowego niewielkiego (5%) skokowego spadku wartości rezystancji stojana silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 4 kW. Założono, że to niekorzystne zjawisko występuje w okresie ustalonej pracy napędu, po zakończeniu okresu rozruchu.

Przyjęto, że parametry znamionowe silnika wynoszą odpowiednio w jednostkach względnych: rezystancja uzwojenia stojana $R_S = 0,059$, rezystancja wirnika $R_R = 0,048$, reaktancja uzwojeń stojana $x_S = 1,92$, reaktancja uzwojeń stojana $x_R = 1,92$, reaktancja wspólna $x_M = 1,82$, znamionowa stała czasowa $T_N = 1/\Omega_{SN} = 3,18 \cdot 10^{-3}$ s, mechaniczna stała czasowa $T_M = 0,86$ s.

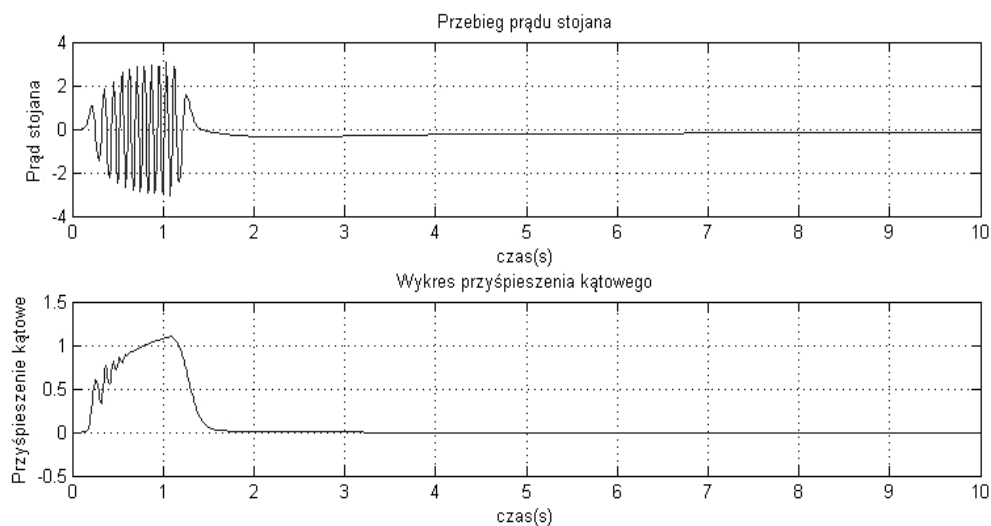
W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych zbudowano model silnika realizujący sterowanie połowo-zorientowane wektora prądu w prostokątnym układzie odniesienia (d, q) wirującym z prędkością kątową równą prędkości kątowej wirnika [1]. Z modelu wyprowadzono sygnały potrzebne do wykonania planowanych badań: wirujący wektor prądu stojana i kinematyczny sygnał przyspieszenia wirnika. Do wału maszyny dołączono masowo-sprężysty układ obciążający. Sygnałem wejściowym wymuszającym ruch układu mechanicznego jest moment elektromagnetyczny silnika indukcyjnego oddziałujący na górny koniec elementu sprężystego. Zakładamy, że zawieszona na elemencie sprężystym masa wykonuje ruch postępowy w dół. Sytuację przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Model obciążenia masowo-sprężystego

Fig. 5. Elastic two-mass load model

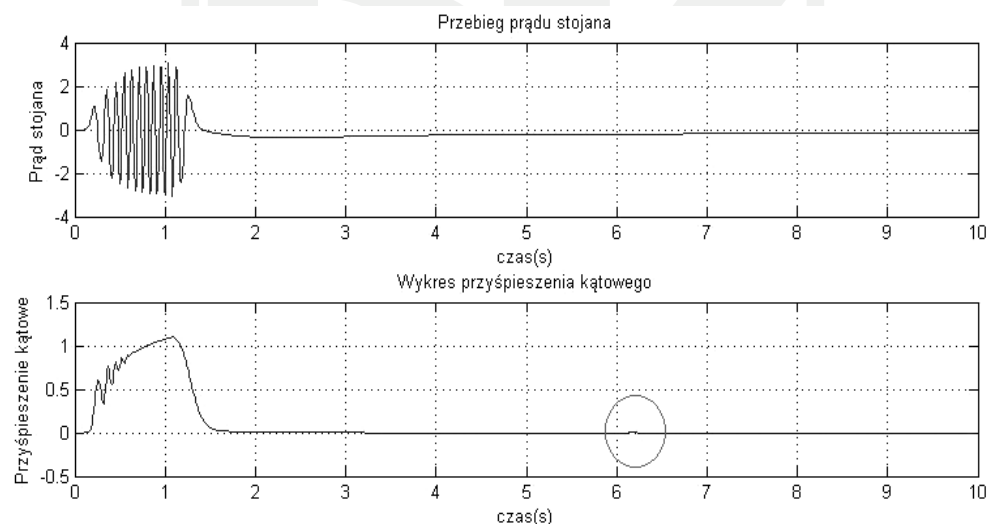
Model symulacyjny układu został zrealizowany w środowisku MATLAB i opisany w pracy [6]. Na rys. 6 przedstawiono przebiegi wektora prądu stojana i przyspieszenia kąowego wału silnika dla przypadku pracy znamionowej, bez wprowadzania skokowej zmiany rezystancji stojana.



Rys. 6. Prąd stojana i przyspieszenie kątowne przy normalnej pracy silnika

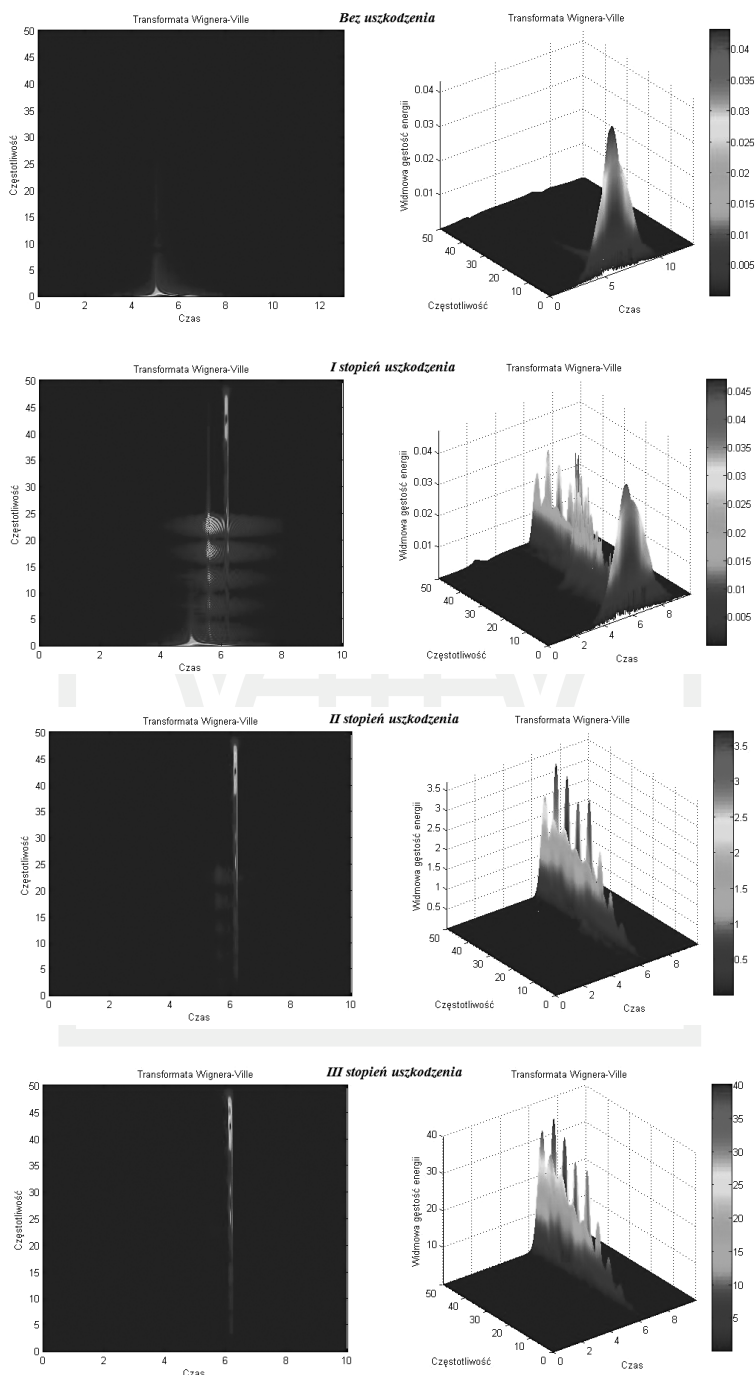
Fig. 6. Stator current and angular acceleration – without faults

Układ mechaniczny oddziałuje momentem zwrotnym na wał silnika. Częstotliwość własna oscylacji masy zależy od jej wartości, a także od wartości współczynnika sprężystości ciągną. Dla przyjętych wartości obciążenia masowo-sprężystego $m = 5 \text{ kg}$ i $k = 30 \text{ N/m}$ jest ona znacznie niższa niż częstotliwości zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w silniku.



Rys. 7. Prąd stojana i przyspieszenie kątowne przy obniżeniu rezystancji stojana

Fig. 7. Stator current and angular acceleration – lowered value of stator resistance



Rys. 8. Widmo Wignera-Ville'a dla wektora prądu przy 3 stopniach obniżenia rezystancji stojana

Fig. 8. Stator current – lowered value of stator resistance

Badania porównawcze przeprowadzono też dla przypadku rozruchu i pracy silnika przy chwilowym skokowym obniżeniu rezystancji stojana o 5% jego wartości znamionowej. Na rys. 7 przedstawiono odpowiednio przebiegi wektora prądu stojana i przyspieszenia kąowego wału silnika dla przypadku, gdy w okresie od 6,1 do 6,3 sekundy następuje wspomniany skokowy spadek wartości rezystancji stojana.

Jak można zauważyć, rezultaty niewielkiego skokowego spadku rezystancji stojana w okresie od 6,1 do 6,3 sekundy są słabo zauważalne i trudne do wykrycia standardowymi metodami pomiarowymi. Dla uzyskania większej efektywności wykrywania tego zaburzenia układu zaleca się pominięcie w analizie elementów szeregów czasowych opisujących stan nieustalony związany z okresem rozruchu.

Analizę Wignera-Ville'a przeprowadzono więc w przedziale czasowym 5,0–10,0 sekund, kiedy badany układ elektromechaniczny pracuje już w stanie ustalonym. Porównano trzy stopnie uszkodzenia, wprowadzając w kolejnych eksperymentach symulacyjnych równolegle w tym samym okresie: 5%, 10%, 20% spadki wartości rezystancji stojana. Uzyskane wyniki dla sygnału wektora prądu stojana przedstawiono w postaci trójwymiarowego widma Wignera-Ville'a na rys. 8. Stanowią one potwierdzenie wysokiej zdolności rozdzielczej reprezentacji Wignera-Ville'a, która dobrze odwzorowuje w przestrzeni czasowo-częstotliwościowej zmiany wirującego wektora prądu spowodowane skokowymi zmianami rezystancji stojana różnego stopnia.

5. Podsumowanie

Badania wykazały, że pojawienie się niewielkich skokowych zmian parametrów obwodu tranzystora mocy falownika czy też niewielkiej zmiany parametrów sieci zasilającej przy częstotliwości próbkowania 2 kHz daje w określonych warunkach zauważalny efekt w postaci zmian charakteru rozkładu współczynników falkowych przebiegu sygnału wirującego wektora prądu stojana. Efekt ten jest wyraźniejszy w przypadku zwiększania podobieństwa kształtu użytej do badań falki podstawowej do charakteru sygnału skojarzonego z uszkodzeniem oraz w przypadku właściwego doboru poziomu dekompozycji.

W badaniach potwierdzono, że przy doborze poziomu dekompozycji należy uwzględnić fakt, że wybrana falka podstawowa $\psi(t)$ (dla skali jednostkowej) skupia swoją energię w pewnym przedziale częstotliwości $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$, poza którym wartość jej transformaty Fouriera może być uważana za pomijalnie małą. Różnica $\omega_{\max} - \omega_{\min}$ jest szerokością pasma tej falki, czyli szerokością kostki Heisenberga w kierunku osi częstotliwości. Częstotliwość środkowa ω_0 i szerokość pasma zależą od kształtu falki wybranej do analizy. Dla różnych falek podstawowych reprezentacja tego samego sygnału na tym samym poziomie dekompozycji w ogólnym przypadku wyglądała inaczej. Potwierdzono, że wybór kształtu falki podstawowej jest więc również istotny.

Przy wyborze poziomu dekompozycji uwzględniono więc wpływ zmian skali na szerokość pasma częstotliwości odpowiadającego wybranemu detalowi. Dla falki, będącej elementem bazy wybranej do przeprowadzenia badań, o skali $a = 2^l$ częstotliwość środkowa wyniesie $\omega_a = \frac{\omega_0}{a}$, podobnie zmieniają się granice pasma $\left[\frac{\omega_{\min}}{a}, \frac{\omega_{\max}}{a} \right]$. Wynika z tego, że zwiększenie skali spowoduje przesunięcie reprezentowanego przez falkę filtru pasmowo

przepustowego w kierunku mniejszych częstotliwości i jednocześnie zmniejszenie szerokości pasma. Oznacza to zwiększenie rozdzielczości w dziedzinie częstotliwości.

Przeprowadzone z zastosowaniem przekształcenia Wignera-Ville'a badanie układu elektromechanicznego, zawierającego napęd z silnikiem indukcyjnym i obciążenie masowo-sprężyste, prowadzi do wniosku, że o ile stosunkowo niewielka skokowa zmiana rezystancji stojana może nie być łatwo zauważona przy monitorowaniu przebiegu czasowego wektora prądu stojana, to jest ona stosunkowo łatwo dostrzegalna przy analizie obrazu transformaty. Po przeprowadzeniu serii testów należy stwierdzić, że istotnym czynnikiem pozwalającym na zwiększenie skuteczności analizy Wignera-Ville'a jest odpowiedni dobór przedziału czasowego. W przypadku kiedy badany przedział czasowy jest zbyt szeroki, to ta część widma, która jest efektem uszkodzeń o niewielkiej skali, często przesłonięta jest przez składnik widma odpowiadający podstawowej harmonicznej sygnału, która niesie wysoką energię. Zjawisko to utrudnia przedstawienie i interpretację wyników.

Wyniki badań wskazują, że identyfikacja zakresu skokowej zmiany rezystancji stojana na podstawie analizy charakteru widma sygnału wektora prądu stojana silnika indukcyjnego może być także dokonywana tą drogą, ponieważ selektywność obrazu transformaty jest wystarczająco wysoka.

Stosując podział na krótsze, odpowiednio dobrane przedziały czasu, jesteśmy w stanie podwyższyć selektywność obrazu transformaty Wignera-Ville'a i zwiększyć czułość automatycznego układu wykrywania i identyfikowania uszkodzeń.

Autor planuje przeprowadzenie dalszych badań w dwu kierunkach:

- uwzględnienie zakłóceń utrudniających diagnozowanie uszkodzenia,
- wykonanie badań laboratoryjnych celem weryfikacji uzyskanych wyników.

Literatura

- [1] Aktas M., Turkmenoglu V., *Wavelet-based switching faults detection in direct torque control induction motor drives*, Science, Measurement & Technology, IET, vol. 4, Issue: 6, November, 2010, 303-310.
- [2] Białasiewicz J.T., *Falki i aproksymacje*, WNT, Warszawa 2004.
- [3] Chow T.W.S., Hai S., *Induction Machine Fault Diagnostic Analysis with Wavelet Technique*, IEEE Trans. Ind. Electronics, vol. 51, No. 3, 2004, 558-565.
- [4] Dinesh K.J., Harikrishan N., Karuppiah S. i inni, *Wavelet based Fault Detection for Wind Turbine*, Proceedings of International Symposium on Devices MEMS, Intelligent Systems & Communication (ISDMISC), Int. Journal of Computer Applications (IJCA), 2011, 7-10.
- [5] Gaeid K.S., Ping H.W., *Wavelet fault diagnosis and tolerant of induction motor: A review*, Int. Journal of the Physical Sciences, vol. 6(3), Feb 2011, 358-376.
- [6] Januszczak A., *Wykrywanie uszkodzeń napędu asynchronicznego przy wykorzystaniu analizy czasowo-częstotliwościowej*, praca dyplomowa, Katedra Automatyki i Technik Informacyjnych, Politechnika Krakowska, 2012.
- [7] Kastha D., Bose B.K., *Investigation of fault modes of voltage-mode inverter system for induction motor*, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, No. 4, Jul/Aug. 1994, 1028-1038.

- [8] Łakomski P., *Zastosowanie wybranych metod widmowych do modelowania i diagnozowania układów elektronicznych*, praca dyplomowa, Katedra Automatyki, Politechnika Krakowska, 2011.
- [9] Shafiel M.A., Khan K., Rahman M.A., *Wavelet Based Diagnosis and Protection of Electric Motors*, Memorial University of Newfoundland St. John's, NL, Canada, 2011.
- [10] Cholewa W., Korbicz J., Kościelny J.M., Patan K., Rogala T., Syfert M., Witczak M., *Diagnostic methods*, Modeling, diagnostics and process control: implementation in the DiaSter system, Springer-Verlag, Berlin 2010, 153-231.
- [11] Witczak M., Korbicz J., *A fault-tolerant control scheme for non-linear discrete-time systems*, Methods and Models in Automation and Robotics, MMAR 2010, Proceedings of the 15th international conference, Międzyzdroje 2010, 302-307 [CD-ROM].
- [12] Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W., *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania*, WNT, Warszawa 2002.
- [13] Duda J.T., *Pozyskiwanie wzorców diagnostycznych w komputerowych analizach sprawności urządzeń*, Diagnostyka procesów i systemów, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2007, 1-16.
- [14] Zając M., *Metody falkowej w monitoring i diagnostyce układów elektromechanicznych*, Seria Inżynieria Elektryczna i Komputerowa, Monografia nr 371, Politechnika Krakowska, 2009.
- [15] Zając M., *Monitorowanie stanów pracy układu elektromechanicznego w oparciu o wykorzystanie analizy falkowej*, The First International Conference on Automatic Control and Information Technology, ICACIT'2011, Lwów 2011.

