

Leon SWĘDROWSKI, Tomasz CISZEWSKI, Ewelina CISZEWSKA

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI, KATEDRA METROLOGII I SYSTEMÓW INFORMACYJNYCH
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Wybrane metody diagnostyki łożysk silników indukcyjnych oparte o pomiar prądu

Dr hab. inż. Leon SWĘDROWSKI

Od ukończenia studiów pracuje w Katedrze Metrologii i Systemów Informacyjnych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, aktualnie jako Dziekan tego Wydziału. Jego zainteresowania zawodowe koncentrują się wokół pomiarów wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, diagnostyki technicznej oraz pomiarów o wysokiej dokładności. Jego główny kierunek badań to diagnostyka silników indukcyjnych.



e-mail: l.swedrowski@ely.pg.gda.pl

Mgr inż. Tomasz CISZEWSKI

Wykładowca oraz doktorant w katedrze Metrologii i Systemów Informacyjnych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej. Aktualnie prowadzi badania dotyczące diagnostyki łożysk silników indukcyjnych na podstawie prądu zasilającego. W obszarze jego zainteresowań leżą również pomiary wielkości nieelektrycznych, komputerowe systemy pomiarowe oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów.



e-mail: t.ciszewski@ely.pg.gda.pl

Mgr inż. Ewelina CISZEWSKA

Absolwentka Politechniki Gdańskiej na kierunkach Matematyka Wydziału Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej oraz Elektrotechnika Wydziału Elektrotechniki i Automatyki. Interesuje się metodami wykrywania uszkodzeń w silnikach elektrycznych oraz modelowaniem 3D maszyn elektrycznych.



e-mail: ewelina_ciszewska@wp.pl

Streszczenie

W artykule zawarto przegląd wybranych metod diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego, bazujących na pomiarach prądu zasilającego. Jedno z nowych rozwiązań zostało zaadaptowane przez autorów do stosowanego przez nich systemu diagnostycznego. Wstępne badania potwierdziły zalety tej metody. Diagnostyka silników indukcyjnych, prowadzona zdalnie poprzez pomiar prądu zasilającego, jest atrakcyjna szczególnie przy braku dostępu do silnika. Przedstawiona koncepcja ma szansę na wdrożenie w przemyśle.

Słowa kluczowe: diagnostyka, operator energetyczny Teagera – Kaisera, pomiar i analiza prądu, silnik indukcyjny, uszkodzenia łożysk.

Selected methods of induction motor bearings diagnostics based on the stator current measurement

Abstract

This paper provides an overview of a few selected solutions of induction motor bearings diagnostics based on current measurements, that have appeared in the literature in recent years. Bearing failure amount is greater than 40% of all engine failures, so their damage-free operation is crucial [1]. Diagnosis of induction motors, carried out remotely by measuring the supply current is convenient and often practical. It could be very useful especially in terms of difficult access to the engine such as mining industries or high voltage engines. Detection of eccentricity and bearings fault, using stator current and stray flux monitoring [2] is described in Section 2. Section 3 introduces the concept of using the Luenberger speed observer for bearings diagnostic purpose [3]. The fourth section shows the stator current and motor efficiency as diagnostic indicators [4]. A new current signal processing solution for bearings diagnostic [6] is described in Section 5. This method using Teager – Kaiser Energy Operator, was applied by the authors to an existing diagnostic system. The results of the preliminary simulation and experimental research showed that this solution gave more precise diagnosis. This experiment was carried out on the engine, with introduced slight damage of the bearings outer race. The presented concept may be implemented in the industry. The authors intend to pursue further studies using this method.

Keywords: bearings defects, diagnostics, induction motor, measurements and analysis of current, Teager – Kaiser Energy Operator.

1. Wprowadzenie

Maszyny elektryczne występują wspólnie praktycznie we wszystkich zakładach przemysłowych. Powszechnie stosowanym urządzeniem w układach napędowych jest silnik indukcyjny. Prostota budowy tego silnika sprawia, że jego najbardziej awaryjnymi elementami są łożyska. Badania statystyczne wyraźnie wskazują, że prawie połowa (ponad 40%) awarii silnika spowodowanych jest uszkodzeniami łożysk [1].

Pierwsze opracowania na temat wykorzystania analizy prądu stojana do diagnostyki łożysk pojawiły się w latach 90-tych ubiegłego wieku. Pomimo to, skuteczność powstałych metod nie jest satysfakcjonująca przez co nie nadają się one do szerszego wdrożenia. W zespole, w którym pracują autorzy publikacji, badania w zakresie tej tematyki prowadzone są od kilkunastu lat. W niniejszym artykule przedstawiono kilka wybranych rozwiązań, jakie pojawiły się w literaturze w ostatnich latach.

Szczególną uwagę autorów zwróciło wykorzystanie operatora energetycznego Teagera – Kaisera w diagnostyce łożysk. Metoda Teager - Kaiser Energy Operator (TKEO) poprzez nieskomplikowane przekształcenia sygnału znacznie ułatwia identyfikację składowych związanych z uszkodzeniami w widmie prądu. Autorzy artykułu przeprowadzili badania mające na celu weryfikację możliwości zastosowania tej metody do wykrywania niewielkich uszkodzeń. Początkowo wykonano badania symulacyjne, mające na celu sprawdzenie odpowiedzi filtra na przykładowe sygnały symulujące przebieg prądu silnika z uszkodzonym łożyskiem. Drugi etap badań obejmował badania eksperymentalne z zastosowaniem przebiegów prądu zarejestrowanych dla silnika z łożyskiem uszkodzonym i nieuszkodzonym. Uzyskane wyniki są obiecujące i dają solidne podstawy do dalszych badań z wykorzystaniem tej metody.

2. Detekcja ekscentryczności i uszkodzeń łożysk z wykorzystaniem rozproszonego strumienia

Proponowana w [2] metoda wykorzystuje pomiary natężenia pola magnetycznego w pobliżu silnika indukcyjnego jako sygnał diagnostyczny. Badano dwa typy uszkodzeń: ekscentryczność dynamiczną oraz uszkodzenie łożysk. Wykonywano zarówno pomiary strumienia rozproszonego poza maszyną, jak i prądu stojana.

W łożyskach pojawiają się dwa rodzaje uszkodzeń. Pierwsze z nich to pojedyncze uszkodzenie jednego z elementów składowych łożyska. Drugie to ogólne zużycie powierzchni tocznych. W przypadku pojedynczego uszkodzenia, w widmie prądu pojawiają się składowe o częstotliwościach charakterystycznych dla uszkodzenia. Zużycie powierzchni przejawia się w widmie prądu pojawieniem się szumu w pewnym paśmie częstotliwości.

Ekscentryczność powoduje pojawienie się dodatkowych składowych pola magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny. Pole magnetyczne pochodzące od statycznej ekscentryczności wiruje z prędkością równą pulsacji sieciowej ω_s , a pole pochodzące od ekscentryczności dynamicznej wiruje z prędkością $\omega_r \pm \omega_s$, gdzie ω_r jest prędkością kątową wirowania wirnika. Dlatego też obserwując pole magnetyczne w szczelinie w funkcji czasu dla wykrycia odpowiednich niesymetrii poszukuje się składowych pola o podanych wyżej częstotliwościach. Przyjmując prąd jako wielkość obserwowaną dla celów diagnostycznych napotyka się na trudność, związaną z tym, że częstotliwości składowych pochodzących od niesymetrii są równe częstotliwości sieciowej, podstawowej dla prądu zasilającego.

Pole magnetyczne silnika badane było czujnikiem zewnętrznym, którego lokalizacja umożliwiła efektywną detekcję poszukiwanych uszkodzeń. Badania ekscentryczności z wykorzystaniem tego czujnika zostały przeprowadzone na dwóch silnikach, z których pierwszy nie posiadał uszkodzeń, natomiast drugi miał fabrycznie wprowadzoną ekscentryczność dynamiczną. Rzeczywiste wartości ekscentryczności w obu silnikach (4% i 18%) zostały pomierzone mechanicznie. Badania były prowadzone w całym zakresie mocy silnika. Częstotliwość próbkowania wynosiła 10 kHz, a czas pomiaru 10 s. Na podstawie badań przeprowadzonych w [2] można było rozróżnić silnik sprawny od silnika z ekscentrycznością dynamiczną. Objawia się ona występowaniem odpowiednich składowych uszkodzeniowych. Wysoki poziom komponentów strumienia, związanych z ekscentrycznością, wyraźnie wskazywał na pojawienie się ekscentryczności dynamicznej.

W przypadku uszkodzeń łożysk, autorzy publikacji [2] przytaczają znane wzory określające częstotliwości wibracji dla każdego typu pojedynczego uszkodzenia łożyska. Dalej podają dwa mechanizmy, prowadzące do modulacji prądu przy uszkodzeniach łożyska. Badania uszkodzeń łożysk zostały przeprowadzone z wykorzystaniem łożyska typu 6205 z wywierconym otworem o średnicy 6 mm w wewnętrznym pierścieniu [2].

Autorzy artykułu [2] przyznają, że pomimo wprowadzenia silnego uszkodzenia łożyska badania nie wykazały możliwości diagnostyki łożysk w silniku indukcyjnym poprzez pomiary prądu stojana jak i strumienia rozproszonego. Obserwowane składowe diagnostyczne w ich badaniach były zbyt małe.

3. Zastosowanie obserwatora prędkości do wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych

Uszkodzenia łożysk wpływają na oscylacje momentu obciążenia. W konsekwencji pojawiają się oscylacje prędkości kątowej wirnika, odpowiednio do zmiany momentu obciążenia.

Jak dowodzą autorzy publikacji [3], uszkodzone łożyska, które są źródłem oscylacji momentu obciążenia, wpływają na modulację prądu fazowego stojana. Wskutek tego, teoretycznie estymowany strumień wirnika i prędkość kątowa będą wykazywać obecność harmonicznych powiązanych z oscylacją momentu obciążenia. Składowe te pojawiają się w widmie estymowanej prędkości i mogą być wykorzystywane do diagnostyki. Analizując widmo estymowanej prędkości obrotowej można zauważyć wzrost amplitud o częstotliwościach odpowiadających uszkodzeniom łożysk.

W publikacji [3] wykorzystano obserwator Luenbergera. Z analizy tego obserwatora wynika, że strumień wirnika przy oscylacji momentu obciążenia podlega modulacji fazowej. Wyznaczona prędkość obrotowa ma składową stałą powiększoną o składowe zmienne, o częstotliwościach równych krotnościom częstotliwości pulsacji momentu obciążenia, których amplituda zależy od głębokości modulacji prądu i strumienia. Proponowany wskaźnik uszkodzeń wykorzystuje różnicę energii widm estymowanej prędkości mechanicznej, pomiędzy widmem przy uszkodzonych łożyskach a widmem wzorcowym.

Zarówno badania symulacyjne jak i eksperymentalne, przedstawione w [3] wykazały, że w widmie estymowanej prędkości możliwe jest odnalezienie składowych świadczących o uszkodzeniach łożysk. Ograniczeniem tej metody jest jednak konieczność

doboru takiej prędkości obrotowej maszyny, aby częstotliwość charakterystyczna dla badanego uszkodzenia znajdowała się w zakresie częstotliwości rezonansowej obserwatora, ponieważ zjawisko rezonansu wzmacnia badany sygnał. W związku z tym obciążenie musi tolerować zmianę prędkości obrotowej na czas pomiaru.

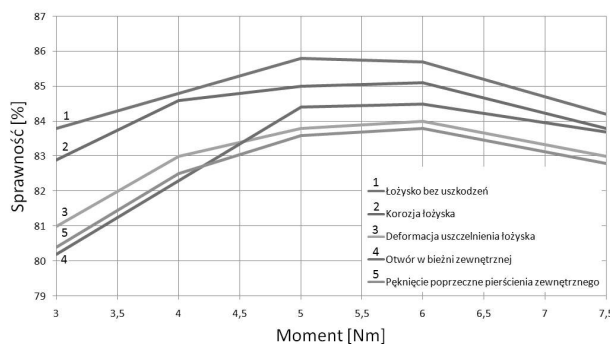
Badania zostały przeprowadzone tylko na jednym silniku z wprowadzonymi silnymi uszkodzeniami do obu pierścieni. Nie można zatem określić wrażliwości proponowanej metody na uszkodzenia w początkowej fazie rozwoju. Zasada działania tego rozwiązania powoduje, że możliwe jest jej wykorzystanie jedynie w napędach, które wyposażone są w bezczujnikowe układy regulacji prędkości obrotowej, z wykorzystaniem obserwatora prędkości.

4. Metoda oparta o analizę prądu stojana i pomiar sprawności silnika

W celu poprawy trafności diagnoz opartych o analizę prądu stojana silnika autorzy metody opisanej w [4] połączyli metodę prądową z metodą pomiaru sprawności silnika. Rozwój uszkodzenia powoduje straty energii a także związane z tym obniżenie sprawności. Sprawność mierzona jest jako stosunek wyjściowej mocy mechanicznej i wejściowej mocy elektrycznej. Autorzy [4] wykonali badania na silniku nieuszkodzonym i silniku z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami, na podstawie których uzyskali charakterystyki sprawności w funkcji momentu obciążenia. W badaniach wykorzystano łożyska zawierające następujące uszkodzenia:

- pęknięcie poprzeczne pierścienia zewnętrznego,
- otwór w bieżni zewnętrznej,
- deformacja uszczelnienia łożyska,
- korozja łożyska.

Wyniki badań dla poszczególnych uszkodzeń przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Wykres sprawności w funkcji momentu obciążenia [4]
Fig. 1. Efficiency as a function of the load torque [4]

Przy minimalnym obciążeniu najmniejszą sprawność odnotowano dla uszkodzeń związanych z pierścieniem zewnętrznym łożyska. Głębsze uszkodzenie, związane z pęknięciem poprzecznym pierścienia zewnętrznego, powoduje większy spadek sprawności. Wykres sprawności dla tego uszkodzenia jest podobny do charakterystyki dla deformacji uszczelnienia. Z punktu widzenia analizy widmowej deformacja uszczelnienia jest praktycznie niewykrywalna, podczas gdy przy wykorzystaniu charakterystyki sprawności wyraźnie widoczny jest wpływ tego uszkodzenia na pracę silnika. Badania wykazały, że korozja łożyska ma najmniejsze znaczenie dla sprawności silnika. Charakterystyka dla tego uszkodzenia jest zbliżona do charakterystyki dla sprawnego łożyska. Tego typu defekt trudno wykryć zarówno przy pomocy analizy widmowej jak i pomiaru sprawności. Wynika z tego, że ma ono znikomy wpływ na właściwą pracę silnika [5].

Autorzy artykułu [4] dowodzą, że przy poważnych uszkodzeniach łożyska spadek sprawności sięga nawet 4% (przy minimalnym obciążeniu). Przy mniej znaczącym uszkodzeniu różnica między łożyskiem nieuszkodzonym a uszkodzonym mieści

się w okolicach 1% sprawności. Przy pomocy opisanej metody można zatem wykryć jedynie poważne uszkodzenia. Metoda nie daje konkretnych informacji na temat rodzaju i stopnia zaawansowania uszkodzenia. Nie pozwala ona również na wykrycie uszkodzenia w jego wczesnej fazie, co jest niezwykle istotne dla zapewnienia bezawaryjnej pracy urządzenia. Rozwiązanie to wiąże się także z dużymi kosztami wynikającymi z zainstalowania dodatkowych urządzeń pomiarowych [5].

5. Metoda Teager - Kaiser Energy Operator

Metoda Teager - Kaiser Energy Operator (TKEO) [6] bazuje na nieliniowym filtrze cyfrowym o niezwykle wąskim paśmie. Prezentuje ona prostą drogę eliminacji głównej harmonicznej badanego przebiegu prądu zasilania przed przeprowadzaniem analizy widmowej prądu.

Poniżej przedstawiono matematyczną definicję operatora TKEO. Dla sygnału ciągłego $x(t)$, TKEO definiowany jest następująco:

$$\psi(x(t)) = \dot{x}(t)^2 - x(t) \cdot \ddot{x}(t), \quad (1)$$

gdzie:

$$\dot{x}(t) = \frac{dx}{dt}. \quad (2)$$

W przypadku sygnału dyskretnego operator TKEO przyjmuje inną postać niż dla sygnału ciągłego. Wykorzystując wstępną aproksymację pochodnej względem czasu [6] otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \psi(x[n]) &= \left(\frac{x[n] - x[n-1]}{\Delta t} \right)^2 - x[n] \cdot \frac{x[n] - 2 \cdot x[n-1] + x[n-2]}{(\Delta t)^2} = \\ &= \frac{1}{(\Delta t)^2} (x[n-1]^2 - x[n-2] \cdot x[n]), \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie $x[n]$ jest sygnałem dyskretnym a Δt jest odwrotnością częstotliwości próbkowania.

Przekształcając równanie (3) otrzymujemy:

$$\psi(x[n]) = \frac{1}{(\Delta t)^2} (x[n]^2 - x[n-1] \cdot x[n+1]) \quad (4)$$

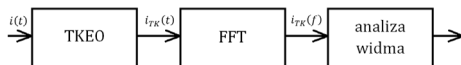
W równaniu (4) wykorzystywane są tylko 3 próbki, zatem odpowiedź TKEO jest niemal natychmiastowa.

Opisywana metoda diagnostyczna bazuje na analizie nowego sygnału $i_{TK}(t)$, powstałego na podstawie pierwotnego sygnału $i(t)$ z TKEO [6]:

$$i_{TK}(t) = \frac{\psi(i(t)) - \overline{\psi(i(t))}}{\psi(i(t))}, \quad (5)$$

gdzie $i_{TK}(t)$ jest składową zmienną funkcji $\psi(i(t))$, znormalizowaną przez podzielenie przez składową stałą.

Diagnostyka uszkodzeń w maszynie przy zastosowaniu TKEO składa się z trzech etapów (rys. 2.) [6]. Początkowo sygnał badany $i(t)$ poddany jest przekształceniu TKEO (4), a następnie sygnał diagnostyczny $i_{TK}(t)$ jest obliczany przy pomocy równania (5). W kolejnym etapie przy pomocy FFT zostaje obliczone widmo $i_{TK}(f)$. W ostatnim etapie następuje analiza widma prądu $i_{TK}(t)$ polegająca na wyszukaniu składowych charakterystycznych świadczących o uszkodzeniach.



Rys. 2. Etapy diagnostyki przy zastosowaniu TKEO: demodulacja prądu fazowego przez TKEO, obliczenie FFT, analiza widma [6]

Fig. 2. The proposed approach: demodulation of the phase current by TKEO, FFT computation, spectrum evaluation [6]

Główną zaletą przedstawionej metody jest jej zdolność odfiltrowania składowej podstawowej sygnału, której występowanie w widmie stanowi istotny problemem diagnostyczny. Poza tym, po zastosowaniu TKEO pulsacje składowych uszkodzeniowych występujących w sygnale $i_{TK}(t)$ można obliczyć przy pomocy klasycznych wzorów stosowanych również w diagnostyce wibracyjnej [7]. Składowe o takich częstotliwościach nie występują w widmie prądu przed przekształceniem TKEO.

Testy przeprowadzone przez autorów [6] zostały wykonane przy znacznym uszkodzeniu łożyska (otwór przelotowy w pierścieniu zewnętrznym). Jest ono na tyle duże, że można je również wykryć na podstawie widma prądu przed transformacją TKEO.

Zastosowanie TKEO istotnie ułatwia właściwą identyfikację uszkodzenia, jednakże nie rozwiązuje głównego problemu związanego z diagnostyką prądową łożysk jakim jest wyspecjalizowany układ pomiarowy pozwalający zmierzyć składowe o bardzo niskich amplitudach nałożonych na składową podstawową. Nawet po odfiltrowaniu składowej podstawowej, amplitudy składowych wynikających z uszkodzenia są nadal wielokrotnie niższe od pozostałych składowych widma. Czułość układu pomiarowego jest zawsze dostosowana do największej składowej w widmie, a zatem składowe wynikające z uszkodzenia są nadal mierzone z niewielką precyzją.

6. Badania z wykorzystaniem metody TKEO

Badania nad wykorzystaniem metody TKEO w przetwarzaniu sygnału prądu silnika przedstawione w [6] zachęciły autorów tego artykułu do dalszych prac zmierzających w tym kierunku.

W pierwszej fazie badań przeprowadzono symulacje, wprowadzając na wejście filtra, działającego zgodnie z zasadą TKEO, sygnał zawierający składowe o różnych częstotliwościach. Przeprowadzono trzy badania. W pierwszym z nich wprowadzono podstawową harmoniczną prądu zasilającego (50 Hz) oraz jedną dodatkową składową (128,25 Hz), która symuluje efekt modulacji składowej o częstotliwości wibracji sygnałem o częstotliwości sieci zasilającej. W tym badaniu przyjęto częstotliwość wibracji równą 78,25 Hz, czego efektem jest pojawienie się w prądzie składowej o częstotliwości 128,25 Hz. W następnych dwóch badaniach dodawano kolejne nieparzyste harmoniczne składowej podstawowej prądu zasilającego (trzecią harmoniczną: 150 Hz i piątą harmoniczną: 250 Hz).

W tabeli 1 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych. Kolumna druga zawiera częstotliwości składowych wprowadzonych na wejście filtra TKEO, natomiast w kolumnie trzeciej umieszczono częstotliwości składowych otrzymane na wyjściu wspomnianego filtra. Częstotliwości składowych wymienionych w tabeli, zostały uszeregowane względem amplitud w kolejności malejącej zaczynając od składowej o najwyższej amplitudzie.

Tab. 1. Wyniki badań symulacyjnych
Tab. 1. Results of simulation tests

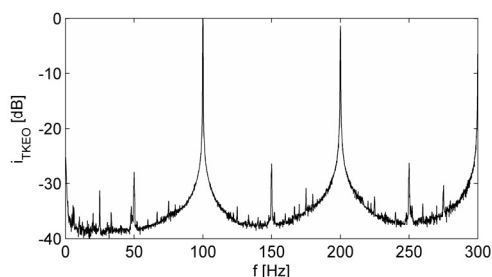
Nr badania	Częstotliwości wprowadzonych składowych, Hz	Częstotliwości składowych po przekształceniu TKEO, Hz
1	50; 128,25	78,25; 178,25
2	50; 150; 128,25	100; 200; 78,25; 21,75; 178,25
3	50; 150; 250; 128,25	200; 100; 300; 400; 121,75; 78,25; 21,75; 178,25; 378,25

Wyniki uzyskane z badań symulacyjnych w pewnym stopniu pokrywają się z wynikami umieszczonymi w publikacji [6]. Mianowicie w [6] na etapie teoretycznym rozpatruje się obecność jedynie dwóch składowych prądu. Nie jest jasno sformułowany wpływ przekształcenia TKEO na pozostałe składowe takie jak trzecia czy piąta harmoniczna częstotliwości sieciowej. Wnioski, nasuwające się z przeprowadzonych badań symulacyjnych potwierdzają występowanie składowej o częstotliwości wibracji.

Przy występowaniu dodatkowych harmonicznych prądu zasilającego w widmie po przekształceniu TKEO, można również zaobserwować szereg dalszych składowych pochodzących od składowej uszkodzeniowej. Na wyjściu filtra nie pojawiają się żadne składowe o częstotliwościach sygnałów wejściowych. Znajdują się natomiast składowe o częstotliwościach równych sumom i różnicom częstotliwości składowych sygnałów wejściowych. Jak widać, nie pojawiła się składowa o częstotliwości sieciowej, można jednak zauważyć składową o częstotliwości uszkodzeniowej 78,25 Hz.

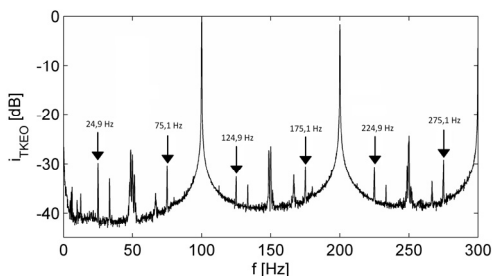
Na podstawie badań symulacyjnych przedstawionych w tabeli 1 można stwierdzić, że wraz z dodaniem kolejnych, harmonicznych na wejściu, rośnie ilość składowych uszkodzeniowych na wyjściu. W związku z tym, zdaniem autorów nie należy poszukiwać jedynie składowej o częstotliwości wibracji, lecz całej rodziny składowych związanych z częstotliwością wibracji.

Przeprowadzono także badania eksperymentalne z zastosowaniem TKEO, w których wykorzystano rzeczywiste przebiegi prądu, zarejestrowane dla różnych uszkodzeń. Rys. 3 przedstawia widmo prądu po przefiltrowaniu metodą TKEO dla silnika bez uszkodzeń, natomiast na rys. 4 zaprezentowano widmo prądu dla silnika z uszkodzonym łożyskiem.



Rys. 3. Widmo prądu silnika nieuszkodzonego po zastosowaniu TKEO
Fig. 3. Current TKEO spectrum for the motor with undamaged bearing

Na rys. 3 nie występują składowe o częstotliwościach uszkodzeniowych.



Rys. 4. Widmo prądu silnika z uszkodzonym łożyskiem po zastosowaniu TKEO
Fig. 4. Current TKEO spectrum for the motor with damaged bearing

Wprowadzone uszkodzenie to punktowy wżer o średnicy 1,5 mm i głębokości 0,7 mm. Jest to zatem uszkodzenie stosunkowo małe. Badania przeprowadzone za pomocą systemu diagnostyki wibracyjnej, wykonane równoległe z pomiarem prądu wykazały również niewielkie uszkodzenie powierzchni bieżni zewnętrznej.

Częstotliwość wibracji dla tego uszkodzenia wynosiła 75,1 Hz. Jak widać na rys. 4 w widmie prądu odnaleziono oraz oznaczono całą rodzinę składowych o częstotliwościach związanych z częstotliwością uszkodzeniową, w tym składową o częstotliwości 75,1 Hz. Składowe o częstotliwościach charakterystycznych dla innych uszkodzeń łożysk nie występują w żadnym z widm.

7. Wnioski z przeprowadzonych badań

Rezultaty badań eksperymentalnych z zastosowaniem TKEO potwierdziły wyniki uzyskane na podstawie badań symulacyjnych. Po odfiltrowaniu podstawowej składowej zasilającej z prądu, można zaobserwować wzrost amplitud składowych uszkodzeniowych w stosunku do amplitudy najwyższej składowej w sygnale. Po filtracji składowe te można odnaleźć z łatwością, co było znacznym utrudnieniem podczas analizy widma sygnału wejściowego. Na wyjściu filtra pojawiają się składowe o częstotliwościach zgodnych z obliczonymi dla metod wibracyjnych. Pozwala to na pewniejszą identyfikację tych składowych. W widmie odfiltrowanego sygnału występuje więcej składowych, niż przed filtracją. Ta cecha może być zarówno wadą jak i zaletą prezentowanego rozwiązania. Występowanie większej liczby składowych związanych z uszkodzeniami jest niewątpliwą zaletą. Natomiast większa liczba pozostałych składowych może utrudniać właściwą identyfikację uszkodzenia.

Prowadzone będą dalsze badania nad wykorzystaniem metody TKEO w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych. W prezentowanych, wstępnych badaniach wykryto uszkodzenie o niewielkim stopniu, można zatem wnioskować o skuteczności tej metody dla detekcji uszkodzeń we wczesnej fazie rozwoju. Odpowiednio wczesne wykrycie uszkodzenia jest dla diagnostyki bardzo istotne ze względu na możliwość zaplanowania remontu, co pozwala obniżyć koszty eksploatacji oraz uniknąć wydatków związanych z nieoczekiwaną awarią. Na pozytywne wyniki badań niewątpliwie miał również wpływ specjalnie do tego celu zaprojektowany układ pomiarowy. Pomiar prądu z właściwą czułością ma mimo wszystko kluczowe znaczenie dla prądowej diagnostyki łożysk.

8. Literatura

- [1] Ciszewski T., Swędrowski L., Wołoszyk M., Ziółko M.: Porównanie wyników badań diagnostycznych łożysk silnika indukcyjnego poprzez pomiar wibracji i prądu stojana, *Electrical engineering*, Issue 72, s. 217, Poznań University of Technology, Poznań 2012.
- [2] Vitek O., Janda M., Hajek V., Bauer P.: Detection of Eccentricity and Bearings Fault Using Stray Flux Monitoring, *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, 2011 IEEE International Symposium on 5-8 September 2011, s. 456 – 461.
- [3] Trajin B., Regnier J., Faucher J.: Detection of bearing faults in asynchronous motors using Luenberger speed observer. *IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, s. 3073-3078, 10-13 November 2008.
- [4] Frosini L., Bassi E., Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, vol. 57, no. 1, January 2010.
- [5] Swędrowski L.: *Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
- [6] Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R., Riera-Guasp M., Perez-Cruz J., Roger-Folch J., Pons-Llinares J., Climente-Alarcon V., Antonino-Daviu J.: Application of the Teager-Kaiser Energy Operator to the Fault Diagnosis of Induction Motors. *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 28, no. 4, December 2013.
- [7] Ciszewski T.: Diagnostyka łożysk silnika indukcyjnego przy użyciu pomiaru prądu zasilającego oraz wibracji. *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 32/2013.

otrzymano / received: 14.05.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.07.2014

artykuł recenzowany / revised paper