

Maciej Sułowicz, Janusz Petryna, Konrad Weinreb, Politechnika Krakowska, Kraków  
Krzysztof Guziec, SENCO Sp. z o.o., Kraków

## PORÓWNAWCZE POMIARY DEFECTÓW KLATEK ROZRUCHOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH POD KĄTEM WYKORZYSTANIA W DIAGNOSTYCE

### COMPARING TESTS OF THE INDUCTION MOTOR WITH STARTING CAGES FAILURES FOR APPLICATION IN DIAGNOSTICS

**Streszczenie:** Bezinwazyjne diagnozowanie silników indukcyjnych klatkowych z dodatkową klatką rozruchową jest ważnym zagadnieniem w diagnostyce eksploatacyjnej tego typu maszyn. Szczególnie jest to istotne w przypadku maszyn, dla których dokonuje się częstych i długich rozruchów. Równie ważne jest zweryfikowanie powszechnie stosowanych metod diagnozowania stanu klatki rozruchowej tych maszyn. Jednym ze sposobów weryfikacji jest przeprowadzenie pomiarów porównawczych dla silnika: zdrowego i z uszkodzoną klatką rozruchową. W artykule przedstawiono wyniki takich pomiarów oraz przeprowadzono analizę dla dwóch takich samych silników dużej mocy. Pomiary przeprowadzono dla rozruchu maszyn oraz w stanie ustalonym. Wyniki pomiarów dla stanu ustalonego analizowano przy wykorzystaniu analizy FFT poszukując symptomów uszkodzeń w widmach prądu. Dla przetworzenia przebiegów prądów rozruchowych zastosowano filtrację cyfrową oraz ciągłą i dyskretną transformację falkową. W podsumowaniu analiz dokonano próby unormowania wskaźników ocen diagnostycznych do postawienia trafnej diagnozy co do stanu klatki rozruchowej badanych maszyn indukcyjnych.

**Abstract:** Non-invasive diagnosing of induction motors with additional starting cage seems to be an important issue in operating diagnosis of this type of machines. This is particularly important in case of machinery subjected to frequent and long starts. Equally important is also to verify commonly used methods of diagnosing starting cages of these machines. One of ways is to perform comparative measurements for a healthy motor and the motor with starting cage damage. This paper presents the results of comparative measurements and analysis for two identical high power motors one of which was healthy and the other had experienced a starting cage damage. The measurements were performed during motors start-up and during steady state operation as well. The results of steady-state measurements were analyzed with use of FFT in order to search for symptoms of damages in motor current spectra. For purpose of motors start-up currents waveforms processing, a digital filtering and continuous and discrete wavelet transformations were used. In the summary, it is shown an attempt of normalization of diagnostic assessments rates for accurate diagnosis about the state of starting cages of tested induction machines.

**Słowa kluczowe:** uszkodzenie klatki, prąd rozruchowy, filtracja cyfrowa, analiza falkowa

**Keywords:** cage damage, start-up current, digital filtering, wavelet analysis

#### 1. Wstęp

Problematyka diagnozowania silników indukcyjnych z dodatkową klatką rozruchową jest omawiana w stosunkowo małej liczbie publikacji [8-10]. Zagadnienie oceny stanu klatki rozruchowej jest szczególnie ważne dla maszyn pracujących w trudnych warunkach rozruchowych, wynikających ze specyfiki napędu, w którym pracują. Uszkodzenia klatek rozruchowych powstają najczęściej w silnikach, które wykonują częste i długie rozruchy.

Najczęściej w literaturze przedstawia się wyniki badań i analiz dla silników indukcyjnych z pojedynczą klatką. W proponowanych metodach badań tych silników można napotkać również

takie, które z powodzeniem można zastosować do diagnozowania uszkodzeń silników dwuklatkowych [2-7].

Najpowszechniej stosowana metoda oceny stanu klatki silnika indukcyjnego, pracującego ze stałymi obrotami, bazuje na analizie widma prądu fazowego stojana i ocenie składowej widma o częstotliwości poślizgowej  $f_0(1-2s)$ , gdzie  $f_0$  jest częstotliwością napięcia zasilającego, a  $s$  wartością poślizgu. Należy odpowiedzieć na pytanie: czy ta metoda analizy jest skuteczna dla oceny uszkodzenia klatki rozruchowej? Być może w tym przypadku należy posłużyć się bardziej wyrafinowanymi metoda-

mi przetwarzania sygnałów, które pozwolą na wyodrębnienie z zarejestrowanego przebiegu prądu charakterystycznych symptomów uszkodzenia?

Oprócz metod oceny stanu klatki wirnika w stanie ustalonym stosuje się również metody dedykowane dla stanów przejściowych, przy zmianie warunków pracy. W tych przypadkach największą skutecznością w rozróżnieniu uszkodzeń charakteryzują się metody filtracji cyfrowej i metody czasowo-częstotliwościowej analizy sygnałów. Przykładami często stosowanej analizy czasowo-częstotliwościowej są STFT i analiza falkowa. Dzięki tym analizom możliwe jest wyodrębnienie osobliwych cech sygnałów, które są cennymi informacjami do wiarygodnej oceny diagnostycznej klatek rozruchowych badanych silników.

Rzeczą przypadku jest pozyskanie danych pomiarowych z dwóch takich samych eksploatowanych silników dużej mocy, z których jeden jest sprawny, a drugi uszkodzony. Okazja taka zdarza się rzadko, bywa możliwa raz na kilka lat eksploatacji dużych maszyn. Autorom udało się zarejestrować takie dane i z tego względu podjęto tę tematykę i wykonano badania porównawcze zdrowej i uszkodzonej maszyny.

W artykule przedstawiono wyniki badań dwóch silników tego samego typu o tych samych parametrach, podczas rozruchu i w stanie ustalonym. Jeden był zdrowy, a w klatce rozruchowej drugiego było uszkodzonych 6 prętów.

Przeprowadzono analizy przebiegów czasowych prądów podczas rozruchu, stosując filtrację cyfrową dolnopasmową oraz ciągłą i dyskretną transformację falkową. Dla stanów ustalonych dokonano analiz widm prądów badanych silników. W podsumowaniu poszczególnych analiz dokonano próby unormowania wskaźników ocen diagnostycznych dla postawienia trafnych diagnoz co do stanu klatek rozruchowych badanych maszyn indukcyjnych.

## 2. Pomiary porównawcze dla silników

Objektami badań były dwa silniki SCF355L o danych znamionowych:  $P_N=250\text{kW}$ ,  $U_N=6000\text{V}$ ,  $I_N=29.6\text{A}$ ,  $n_N=2964\text{ obr/min}$ ,  $f_N=50\text{Hz}$ . Silniki te mają po 38 żłobków w wirniku i 48 żłobków w stojanie. Badania obu silników przeprowadzono na stacji prób przy obniżonym napięciu zasilania do około 2kV. Silniki były uruchamiane i pracowały bez obciążenia na biegu jałowym. Widok obu maszyn przedstawiono na Rys.1 do Rys.3.



Rys. 1. Widok silnika sprawnego, badanego podczas eksperymentu na stacji prób



Rys. 2. Widok silnika z uszkodzeniem 6 prętów klatki rozruchowej, badanego podczas eksperymentu na stacji prób



Rys. 3. Widok stojana uszkodzonego silnika po wyjęciu wirnika do naprawy

Na Rys.4 do Rys.6 przedstawiono wirnik po wyjęciu z maszyny, dla którego stwierdzono uszkodzenie 6 prętów klatki rozruchowej.



Rys. 4. Uszkodzony wirnik po wyjęciu z maszyny



Rys. 5. Widok uszkodzonego wirnika, wskazanie miejsca uszkodzeń w klatce rozruchowej



Rys. 6. Widok miejsca uszkodzenia prętów klatki wirnika badanego silnika

Z wykorzystaniem przenośnego systemu akwizycji danych składającego się z karty pomiarowej, trzech sond pomiarowych prądowych A22, karty pomiarowej NI USB 6259 BNC oraz notebooka z oprogramowaniem do zbierania i przetwarzania danych dokonano rejestracji przebiegów trzech prądów podczas rozruchów i pracy w stanach ustalonych badanych maszyn.

### 3. Analiza uszkodzeń w stanie ustalonym

Ocenę diagnostyczną stanu klatki wirnika silnika indukcyjnego podczas stanu ustalonego dokonuje się najczęściej w oparciu o charakterystyczne składowe o częstotliwościach  $(1 \pm 2s)f_0$  w prądach zasilających maszynę.

W przypadku, gdy pręt klatki jest uszkodzony, prąd nie może przez niego płynąć, pojawia się zaburzenie w obwodzie elektrycznym klatki. W stanie ustalonym to zaburzenie indukuje pewne składowe prądu w uzwojeniu stojana, z charakterystycznymi częstotliwościami. W zależności od parametrów konstrukcyjnych maszyny, częstotliwości te mogą być obliczone za pomocą wzorów [2],[3],[7],[10]:

$$f_{bar} = (1 \pm 2ks)f_0, \quad k=1,2,3... \quad (1)$$

$$f_{bar} = [k/p(1-s) \pm s]f_0, \quad k/p=1,3,5... \quad (2)$$

gdzie:

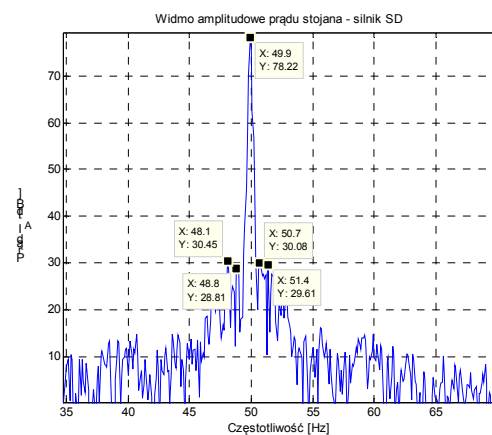
$f_{bar}$  - częstotliwości od uszkodzeń prętów,

$p$  - liczba par biegunów,

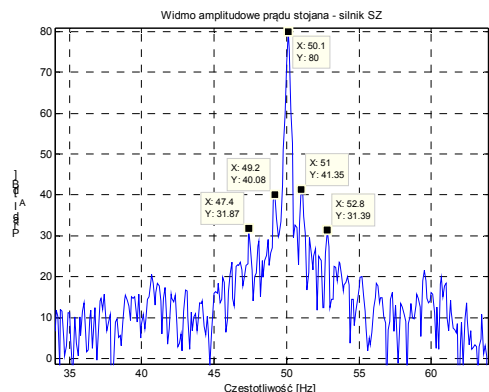
$f_0$  - częstotliwość napięcia zasilania,

$s$  - poślizg.

W oparciu o wzory (1), (2) można również określić charakterystyczne częstotliwości harmonicznych w widmach prądu maszyn indukcyjnych dwukłatkowych, związanych z uszkodzeniem klatki rozruchowej. Na Rys.7 i Rys.8 przedstawiono widma prądu stojana fazy A, dla obu silników z zaznaczonymi charakterystycznymi częstotliwościami. Na pierwszy rzut oka widać znaczące różnice w obu widmach. W silniku z uszkodzoną klatką bardzo wyraźnie zostały wyeksponowane częstotliwości pochodzące od uszkodzeń klatki.



Rys. 7. Widmo amplitudowe prądu stojana silnika zdrowego



Rys. 8. Widmo amplitudowe prądu stojana silnika z uszkodzoną klatką rozruchową

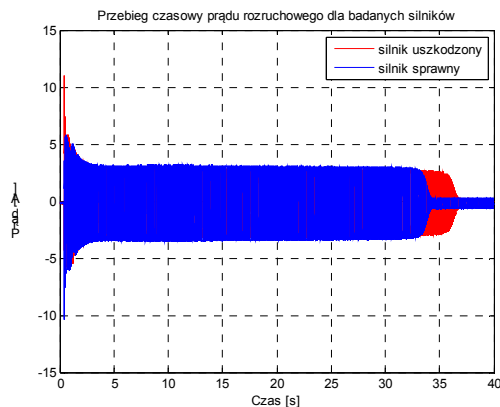
Jeśli nie mamy wiedzy o lokalizacji uszkodzenia, jak w przypadku przeprowadzonych badań porównawczych, to tą metodą nie można jednoznacznie określić, czy w wirniku doszło do uszkodzenia klatki roboczej, czy rozruchowej. W większości przypadków informacja o powstałym już uszkodzeniu klatki, czy powstającej serii wysokorezystancyjnych połączeń spawów w klatce roboczej lub rozruchowej, powinna być sygnałem do podjęcia niezwłocznych działań. Jednak dopiero po wyjęciu wirnika z maszyny można zlokalizować, w której z klatek i gdzie doszło do uszkodzenia i jaki jest jego rozmiar. To zaś uzyskuje się inną metodą.

#### 4. Analiza uszkodzeń podczas rozruchu

Przy diagnozowaniu uszkodzeń silników indukcyjnych dwuklatkowych nie wystarczy poprzestać tylko na metodzie analizy w stanie ustalonym. Bardzo dobrym rozszerzeniem analiz diagnostycznych jest obserwacja charakterystycznych symptomów podczas rozruchu badanej maszyny. W stanie dynamicznym pracy maszyny dedykowane metody analizy pozwalają wyeksponować pewne osobliwości przebiegu, które są dobrym sygnałem diagnostycznym. Metody analizy prądów zarejestrowanych podczas rozruchu są szczególnie ukierunkowane na obserwację zmian składowej poślizgowej podczas rozpędzania się wirnika maszyny do prędkości ustalonej. W trakcie rozruchu składowa poślizgowa zmienia swą częstotliwość wraz ze zmianą poślizgu. Częstotliwość ta zmienia się w szczególny sposób. Wynosi ona 50Hz w chwili, gdy maszyna jest załączana do pracy, następnie w początkowej fazie rozruchu, gdy wirnik przyśpiesza, częstotliwość ta maleje i osiąga wartość 0Hz dla poślizgu równego 0.5. Od tego momentu częstotliwość ponownie

zwiększa się, osiągając prawie 50Hz w stanie ustalonym. Obserwacja zmian składowej poślizgowej jest możliwa dzięki zastosowaniu filtracji cyfrowej lub analogicznie działającej analizy falkowej.

Dla obu badanych silników zarejestrowano prądy rozruchowe w podobnych warunkach zasilania i przy pracy na biegu jałowym. Przebiegi prądów rozruchowych dla obu maszyn przedstawiono na Rys.9.

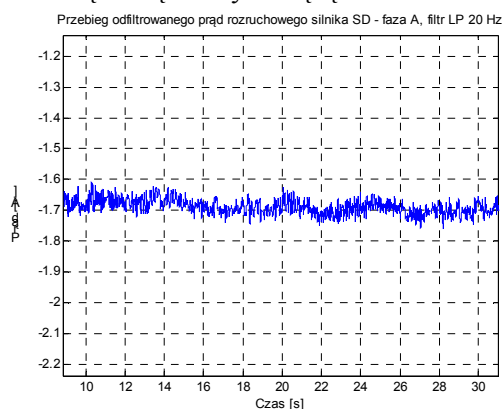


Rys. 9. Przebiegi czasowe prądu rozruchowego badanych silników

Na pierwszy rzut oka widać różnice w czasie rozruchu, który dla silnika z uszkodzoną klatką jest około 3s dłuższy, niż dla silnika zdrowego.

#### 4.1. Analiza uszkodzeń z wykorzystaniem filtracji cyfrowej sygnałów

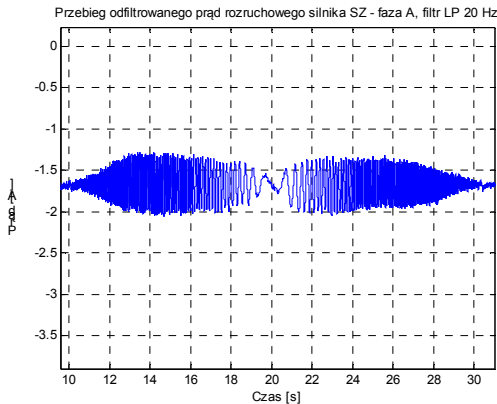
Zarejestrowany podczas rozruchu prąd jest poddany filtracji dolnoprzepustowej, z częstotliwością odcięcia wynoszącą 10-25Hz.



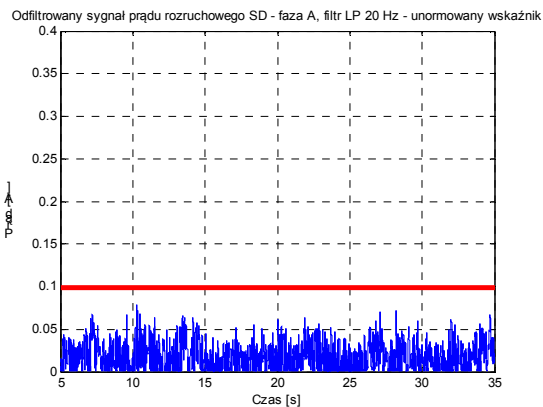
Rys. 10. Odfiltrowany przebieg prądu rozruchowego silnika zdrowego

Informację diagnostyczną pozyskuje się z tych zakresów prądu rozruchowego, którym odpowiada prędkość obrotowa wirnika nieco większa i nieco mniejsza od połowy prędkości synchronicznej.

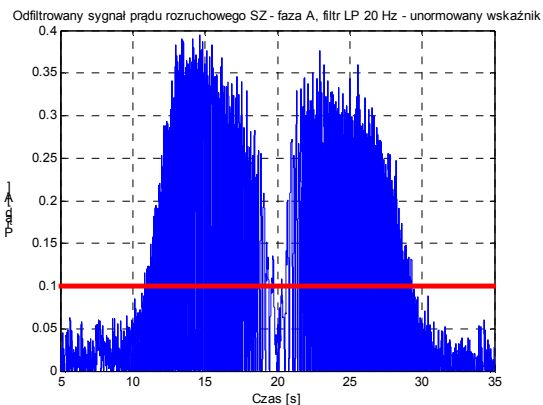
Przebiegi prądów rozruchowych po filtracji dolnoprzepustowej filtrem Butterwortha 6 rzędu i częstotliwości odcięcia 20Hz przedstawiono na Rys.10 i Rys.11.



Rys. 11. Odfiltrowany przebieg prądu rozruchowego silnika uszkodzonego



Rys. 12. Ocena stanu dla silnika zdrowego



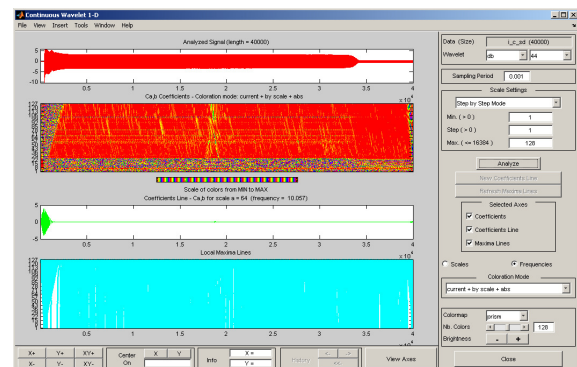
Rys. 13. Ocena stanu dla silnika uszkodzonego

Na Rys.10 i Rys.11 przedstawiono unormowane sygnały, które można wykorzystać do oceny diagnostycznej. Wyznaczenie wartości granicznej sygnału, powyżej której klatkę silnika można uważać za uszkodzoną, jest zadaniem trudnym i zależy między innymi od przeznaczenia napędu, intensywności rozruchów

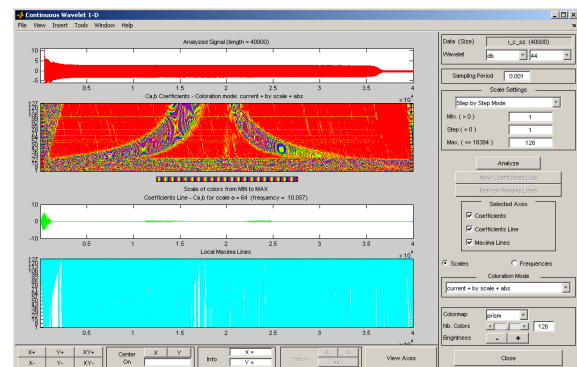
i rodzaju pracy maszyny (praca ciągła, dorywcza, przerywana), kryterium dopuszczalności do eksploatacji, marginesu bezpieczeństwa i ryzyka awarii. Na podstawie doświadczeń własnych autorów przyjęto, że w konkretnym przypadku badanych maszyn granicznym poziomem dla tak przeprowadzonego i przetworzonego pomiaru będzie wartość zaznaczona linią czerwoną (Rys. 11 i Rys. 12).

#### 4.2. Analiza uszkodzeń z wykorzystaniem ciągłej transformacji falkowej

Transformacja falkowa, podobnie jak analizy częstotliwościowe, przedstawia sygnał jako sumę funkcji bazowych, w tym przypadku falek. Cechą wyróżniającą ten zbiór funkcji jest wzajemne powiązanie, realizowane przez proste operacje skalowania -  $a$  i przesunięcia -  $b$  prototypowej funkcji zwanej falką podstawową. Dla ciągłej transformacji falkowej CWT (ang. Continuous Wavelet Transform) zarówno skala  $a$  jak i przesunięcie falki wzdłuż sygnału  $b$  są zmieniane w sposób ciągły [1]. Wynik analiz z wykorzystaniem CWT jest najczęściej przedstawiany w postaci skalogramów współczynników dla różnych wartości  $a$  i  $b$ .



Rys. 14. Okno analiz CWT – silnik zdrowy



Rys. 15. Okno analiz CWT – silnik uszkodzony

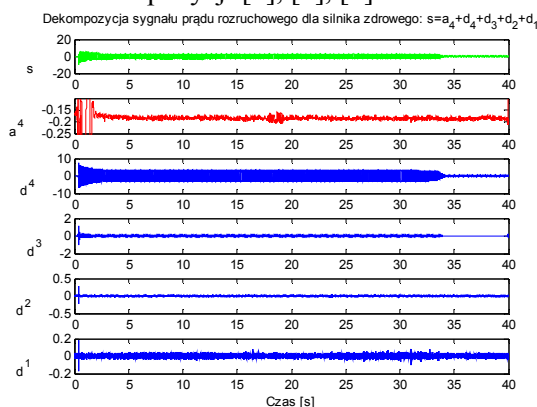
Na Rys.14 i Rys.15 przedstawiono analizy dla falki Daubechies rzędu 44, o 128 współczynni-

kach  $a$ . W przedstawionych oknach, z wykonanymi w programie Matlab analizami dla silnika zdrowego i uszkodzonego, widoczne są wyraźne różnice pomiędzy skalogramami dla obu przypadków.

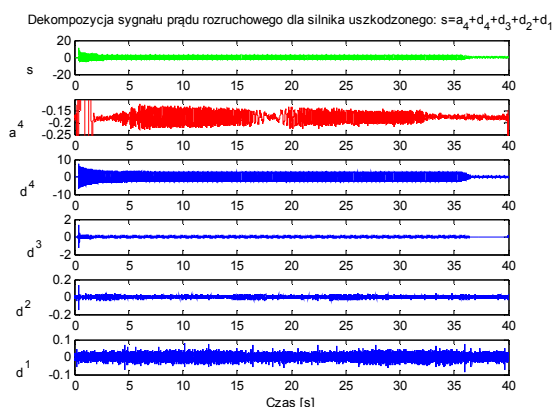
### 4.3. Analiza uszkodzeń z wykorzystaniem dyskretnej transformacji falkowej

Ilość informacji zawartej w ciągłej transformacie falkowej jest nadmiarowa z punktu widzenia diagnostyki. Poddając parametr: skali -  $a$  oraz przesunięcia -  $b$  dyskretyzacji, uzyskujemy dyskretną transformatę falkową [1].

Dyskretna transformacja falkowa DWT (ang. Discrete Wavelet Transform) wykonuje dekompozycję próbkowanego sygnału  $s(t)$  w  $n+1$  sygnałów falkowych. Otrzymujemy sygnał aproksymacji  $a_n(t)$  i  $n$  sygnałów detalu  $d_j(t)$  z  $j$  zmieniającym się od 1 do  $n$ , gdzie  $n$  jest poziomem dekompozycji [1], [3], [8].



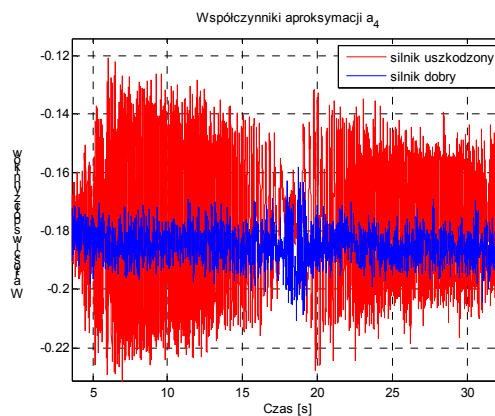
Rys. 16. Analiza DWT – silnik zdrowy



Rys. 17. Analiza DWT – silnik uszkodzony

Zarejestrowane przebiegi prądów rozruchowych poddano analizie z wykorzystaniem dyskretnej transformacji falkowej. Do analizy wybrano falkę Daubechies rzędu 44. Dokonano dekompozycji sygnału prądu rozruchowego do 4 poziomu dekompozycji. Wyniki analiz odpo-

wiednio dla silnika zdrowego i uszkodzonego przedstawiono na Rys.16 i Rys.17. Natomiast na Rys.18 przedstawiono porównanie współczynników aproksymacji  $a_4$ .



Rys. 18. Porównanie współczynników aproksymacji  $a_4$

Analizując przedstawione na Rys.18 przebiegi współczynników aproksymacji z łatwością można zauważyć różnice pomiędzy amplitudą zmian współczynnika aproksymacji dla silnika zdrowego a współczynnikiem aproksymacji dla silnika z uszkodzoną kłatką wirnika.

Różnice te można także unormować i dalej przyjąć pewne miary oceny stanu klatki wirnika silników jednoklatkowych, jak też silników dwuklatkowych. Oprócz wybranego w celu porównania sygnału aproksymacji można, przy ustaleniu różnych poziomów dekompozycji, analizować szczegóły i następnie wyniki analizy wykorzystać w algorytmach oceny diagnostycznej.

Stosowanie opisanych analiz wymaga znajomości przebiegu prądu rozruchowego nieuszkodzonej maszyny. Ten przebieg powinien być użyty jako odniesienie bazowe dla oceny przebiegu prądu rozruchowego w przyszłości.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów porównawczych dwóch silników indukcyjnych dwuklatkowych i ich analizę z wykorzystaniem FFT, filtracji cyfrowej oraz ciągłej i dyskretnej transformacji falkowej.

Na przykładzie przeprowadzonych analiz pokazano, że metody analizy dedykowane zarówno do stanów ustalonych, jak i do sygnałów zarejestrowanych podczas przejściowych stanów pracy maszyny są skuteczne do wykrywania uszkodzeń klatek rozruchowych silników indukcyjnych dwuklatkowych. Gromadzenie tak

cennych danych pomiarowych, które udało się pozyskać, w bazach uszkodzeń może pozwolić w przyszłości na wypracowanie wiarygodnych wskaźników do oceny ilościowej uszkodzeń.

## 6. Literatura

- [1]. Białasiewicz J.T.: *Falki i aproksymacje*. WNT, 2004.
- [2]. M. Riera-Guasp, J. A. Antonino-Daviu, J. Rusek, J. Roger-Folch: *Low frequency filtering for the diagnosis of cage asymmetries in induction machines*. ICEM 2006, s. 1-6, CD.
- [3]. Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J.A., Pineda-Sanchez M., Puche-Panadero R., Perez-Cruz J.: *A General Approach for the Transient Detection of Slip-Dependent Fault Components Based on the Discrete Wavelet Transform*. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 55, 2008, pp. 4167-4180
- [4]. Rad M.: *Automatyczna diagnostyka klatki wirnika na podstawie prądu rozruchu silnika indukcyjnego*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 79, 2008, wyd. BOBRME KOMEL, s. 113-115.
- [5]. Dybowski P., Rams W., Rusek J.: *Problems of Practical Diagnostics of Induction Machines in Industry*. Electrical Power Quality and Utilisation, Journal Vol. XIV, No. 1, 2008, pp. 79-83.
- [6]. Widodo A., Yang B.-S., Gu D.-S., Choi B.-K.: *Intelligent fault diagnosis system of induction motor based on transient current signal*. Mechatronics vol. 19, 2009, pp. 680-689.
- [7]. Weinreb K., Sułowicz M.: *Skuteczne wykrywanie ekscentryczności dynamicznej w silniku asynchronicznym*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 83, 2009, wyd. BOBRME KOMEL, s. 207-212.
- [8]. Antonino-Daviu J., Riera-Guasp M., Pons-Llinares, J., Jong Bin Park, Sang Bin Lee, Jiyeon Yoo, Kral C.: *Detection of broken outer cage bars for double cage induction motors under the startup transient*. Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), 2011 IEEE International Symposium on, 5-8 Sept. 2011, pp. 1-8.
- [9]. Drak B.: *Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 89, 2011, wyd. BOBRME KOMEL, s. 7-14.
- [10]. Miksiewicz R.: *Diagnostyka silników indukcyjnych dwuklatkowych z uszkodzonymi prętami*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 95, 2012, wyd. BOBRME KOMEL, s. 83-88.
- [11]. Drak B.: *Zniszczenia klatek rozruchowych wirników dwuklatkowych silników indukcyjnych*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 97, 2012, wyd. BOBRME KOMEL, s. 63-66.

## Autorzy

dr inż. M. Sułowicz, pesulowi@cyf-kr.edu.pl  
 dr inż. J. Petryna, jpetryna@pk.edu.pl  
 dr inż. K. Weinreb, peweinre@cyf-kr.edu.pl

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii  
 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24  
 mgr inż. K. Guziec, office@senco.krakow.pl  
 SENCO Sp. z o.o., 30-716 Kraków  
 ul. Albatrosów 10a

## Informacje dodatkowe

Praca została wykonana w ramach badań własnych autorów dzięki uprzejmości firmy EKO-ENERGIA z Krakowa, która udostępniła silniki do badań na swojej Stacji Prób.