

## **DIAGNOSTYKA ŁOŻYSK SILNIKA INDUKCYJNEGO POPRZEZ ANALIZĘ PRĄDU SILNIKA METODĄ NTC. CZEŚĆ I – OPIS ZASTOSOWANEJ METODY**

**Tomasz CISZEWSKI**

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
tel.: 58 347 29 45, e-mail: tomasz.ciszewski@pg.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano nową metodę przetwarzania sygnału prądu silnika indukcyjnego do celów diagnostyki łożysk oraz jej walidację przy pomocy badań eksperymentalnych. Badania przeprowadzono dla trzech różnych uszkodzeń łożysk przy pełnym obciążeniu silnika. Pierwsza część artykułu zawiera wprowadzenie do tematyki diagnostyki łożysk, przegląd metod diagnostycznych oraz podstawy teoretyczne zastosowanej przez autora metody. W drugiej części artykułu przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dla łożysk z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami oraz dla łożysk bez uszkodzeń.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka łożysk silnika indukcyjnego, MCSA, cyfrowe przetwarzanie sygnału, statystyka wyższych rzędów.

### **1. WPROWADZENIE**

Maszyny elektryczne występują wspólnie w większości zakładów przemysłowych. Silnik indukcyjny (SI) jest obecnie najczęściej stosowaną maszyną w elektrycznych układach napędowych. Prosta konstrukcja SI sprawia, że jego najbardziej awaryjnym elementem są łożyska. Według analiz statystycznych uszkodzenia łożysk stanowią ponad 40% wszystkich uszkodzeń [1]. Dlatego diagnostyka tego elementu jest niezwykle istotna z punktu widzenia bezawaryjnej pracy układu napędowego.

Trwałość łożyska podawana przez producentów jest jedynie szacowanym okresem bezawaryjnej pracy. Rzeczywisty czas pracy łożyska do uszkodzenia zależy od bardzo wielu czynników, między innymi od jakości wykonania, precyzji montażu, właściwego smarowania czy też temperatury pracy. Chcąc zatem określić aktualny stan oraz prognozować czas bezawaryjnej pracy maszyny, należy regularnie przeprowadzać badania diagnostyczne. Pozwala to uniknąć awarii i zaplanować niezbędne remonty maszyn przed wystąpieniem uszkodzenia jak również zapobiec przedwczesnej wymianie sprawnego łożyska. Wczesne wykrycie uszkodzenia łożyska zapobiega awariom kolejnych elementów silnika, np. wirnika, które w konsekwencji mogą doprowadzić do zniszczenia całego silnika.

Uszkodzenie łożyska powoduje powstanie symptomów diagnostycznych, których obserwacja może nieść cenne informacje diagnostyczne. Do symptomów tych można zaliczyć dodatkowe drgania spowodowane przez uszkodzone elementy, podwyższony poziom hałasu czy wzrost temperatury pracy. Istnieje wiele metod diagnostyki łożysk

opartych o pomiar różnych wielkości fizycznych. Obecnie najczęściej stosowane metody diagnostyki łożysk wykorzystują pomiar wibracji w węzle łożyskowym. Mają one jednak podstawową wadę, polegającą na konieczności dostępu do maszyny dla zainstalowania czujników. Dostęp do pracującej maszyny jest często ograniczony, w związku z tym pomiar wibracji jest trudny do zrealizowania. Dlatego poszukuje się metod diagnostyki, które nie wymagałyby instalowania czujników bezpośrednio na silniku. Takie możliwości stwarzają metody oparte o analizę prądu zasilającego silnik.

Metody diagnostyczne wykorzystujące pomiar prądu SI są z powodzeniem wykorzystywane do badania stanu izolacji stojana, klatki wirnika czy zwarcie międzyzwojowych w stojanie. Prąd jest wielkością, która niesie ze sobą informacje diagnostyczne, na podstawie których możliwa jest diagnostyka większości elementów maszyny. Cały czas prowadzone są badania nad metodami prądowymi diagnostyki łożysk SI. Wykorzystanie pomiaru jednej wielkości fizycznej do badania kilku elementów pozwoliłoby zredukować koszty diagnostyki. Dlatego opracowanie skutecznej metody diagnostyki łożysk opartej o pomiar prądu SI umożliwiłoby implementację diagnostyki całego silnika przy pomocy jednego przetwornika pomiarowego.

### **2. WYBRANE METODY STOSOWANE W DIAGNOSTYCE ŁOŻYSK SILNIKÓW INDUCYJNYCH**

Istnieje szereg metod, które opracowano dla diagnostyki łożysk w SI. Można je podzielić według mierzonych wielkości fizycznych, które są podstawą badania.

Są to metody oparte na:

- 1) pomiarach wibracji klasycznym akcelerometrem piezoelektrycznym [2] [3] [4] [5];
- 2) pomiarach temperatury łożysk [6];
- 3) pomiarach akustycznych [7] [8];
- 4) laserowych pomiarach wibracji [9];
- 5) badaniach przebiegu mocy chwilowej pobieranej przez silnik [1] [10];
- 6) pomiarach prądu [11] [12];
- 7) pomiarach strumienia magnetycznego [13].

Można je również podzielić według metod przetwarzania sygnału.

Są to metody wykorzystujące m.in.:

- 1) szybką transformatę Fouriera FFT [11] [12] ;
- 2) transformatę falkową [3] [5];
- 3) sztuczne sieci neuronowe [2] [5];
- 4) wykrywanie impulsów udarowych (metoda SPM) [4];
- 5) współczynnik kurtozy [14];
- 6) obwiednię sygnału wysokoczęstotliwościowego [15].

Każda praktycznie zrealizowana metoda opiera się na pomiarze przynajmniej jednej z wielkości fizycznych i na co najmniej jednej z metod przetwarzania sygnału według powyższych zestawień. Spośród wielkości fizycznych, wykorzystywanych do diagnostyki łożysk najczęściej wykorzystywana jest wibracja. Wśród metod opartych o pomiar wibracji można wyróżnić proste metody, badające jedynie ogólny poziom drgań. Istnieją również metody bardziej zaawansowane, które pozwalają określić stopień i rodzaj uszkodzenia łożyska. Dzięki temu możliwe jest wykrycie uszkodzenia we wczesnym stadium jego rozwoju, zapobiegając tym samym dalszym uszkodzeniom.

W dotychczasowych opracowaniach na temat prądowej diagnostyki łożysk SI [1][11][12], w widmie prądu poszukiwano składowych o określonych częstotliwościach. Takie podejście zakłada pojawienie się przy uszkodzeniach dodatkowych składowych o stałej amplitudzie, których poszukiwano w widmie uśrednionym. Jak dowodzą autorzy artykułu [16], drgania spowodowane uszkodzeniem łożyska mają charakter następujących krótko po sobie drgań gasnących o określonej częstotliwości. Ze względu na charakter przejściowy składowych diagnostycznych, spowodowanych drganiami gasnącymi, po uśrednieniu widma ich wykrycie staje się utrudnione ze względu na ich bardzo małe amplitudy. W związku z tym, autor niniejszej pracy proponuje metodę, w której idzie o krok dalej, analizując zmienność dodatkowych składowych, przyjmując ją jako wskaźnik diagnostyczny. Zastosowanie Znormalizowanej Potrójnej Kowariancji (NTC) pozwala na wykrycie nieliniowych (wykładniczych) zmian amplitud zespolonych dodatkowych składowych. Jest to nowe podejście do diagnostyki łożysk w silnikach indukcyjnych, które w dalszej części pracy zostało zweryfikowane doświadczalnie.

### 3. NTC – NORMALIZED TRIPLE COVARIANCE (ZNORMALIZOWANA POTRÓJNA KOWARIANCJA)

#### 3.1. Opis metody

Autor artykułu zaproponował nowe podejście do przetwarzania sygnału diagnostycznego zawartego w widmie prądu SI. Proponowana metoda obróbki sygnału prądu to NTC opisana przez równanie (1):

$$NTC(x, f_1, f_2, f_3) = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((X_i(f_1) - E(X(f_1))) \cdot (X_i(f_2) - E(X(f_2))) \cdot (X_i(f_3) - E(X(f_3))))}{\sqrt{\sigma^2(X(f_1)) \cdot \sigma^2(X(f_2)) \cdot \sigma^2(X(f_3))}} \quad (1)$$

gdzie:  $x$  – sygnał w dziedzinie czasu dyskretnego,  $n$  – liczba segmentów czasowych,  $X_i(f_j)$  – współczynnik szeregu Fouriera z sygnału  $x$  dla  $i$ -tego segmentu czasowego dla częstotliwości  $f_j$ ,  $E(X(f_j))$  – wartość średnia

współczynników szeregu Fouriera dla częstotliwości  $f_j$  ze wszystkich segmentów czasowych,  $\sigma^2(X(f_j))$  – wariancja współczynników szeregu Fouriera dla częstotliwości  $f_j$  ze wszystkich segmentów czasowych.

Zgodnie z powyższym wzorem, mnożone składowe zostały pomniejszone o wartość średnią, co skutkuje brakiem wrażliwości kowariancji na sygnały o stałych amplitudach i fazach. Jeżeli amplitudy i fazy zmieniają się w czasie dla wszystkich trzech częstotliwości, wartość NTC będzie tym wyższa im bardziej zbliżone będą do siebie zmiany amplitud wybranych składowych. Dotychczasowe metody, oparte na pomiarach małych składowych diagnostycznych w widmie prądu, stwarzały problemy z pomiarem amplitud tych składowych w obecności dużych amplitud innych składowych. Zaletą metody NTC jest brak wrażliwości na amplitudę składowej podstawowej analizowanego sygnału. Natomiast wynik obliczania NTC jest zależny od kształtu zmienności w czasie amplitud składowych o częstotliwościach  $f_1, f_2, f_3$ , dla których obliczana jest wartość NTC.

Obliczenie NTC wymaga podzielenia sygnału prądu na segmenty czasowe. Rozdzielczość widma jest odwrotnie proporcjonalna do długości segmentu czasowego. Przy zastosowaniu opisywanej metody do prądowej diagnostyki łożysk w silniku indukcyjnym należy wybrać przynajmniej 8 sekundowy segment czasowy. Pozwala to uzyskać dostateczną rozdzielczość widma, wymaganą ze względu na bardzo niskie wartości amplitud poszukiwanych składowych, których przy niższej rozdzielczości nie można rozróżnić od szumu pomiarowego. Aby uzyskać więcej segmentów czasowych, sygnał należy podzielić na segmenty nakładające się na siebie. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie tej części sygnału, która w poprzednim segmencie czasowym jest wygaszana przez okno wygładzające.

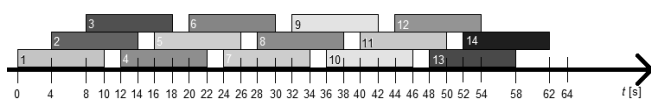
Dla każdego segmentu czasowego wyznaczana jest szybka transformata Fouriera z oknem Blackmana. Na podstawie uzyskanych widm wyznaczana jest prędkość obrotowa oraz częstotliwość sieci zasilającej dla każdego segmentu osobno. Na podstawie uzyskanych informacji, wyznaczane są częstotliwości charakterystyczne dla których obliczana jest wartość NTC. Dzięki temu na wynik obliczenia nie powinny mieć wpływu zmiany prędkości obrotowej oraz częstotliwości sieciowej w trakcie pomiaru. Wartość NTC wyznaczana jest oddzielnie dla każdej fazy silnika, końcowym wynikiem jest wartość średnia z trzech wartości NTC (obliczonych dla poszczególnych faz).

#### 3.2. Algorytmu przetwarzania sygnału

Obliczenie NTC wymaga podzielenia sygnału prądu na segmenty czasowe. W celu uzyskania rozdzielczości widma 0,1 Hz, w proponowanym rozwiązaniu wybrano 10 sekundowy segment czasowy. Zdaniem autora uzyskana rozdzielczość powinna być wystarczająca do identyfikacji składowych, których przy niższej rozdzielczości nie można rozróżnić od szumu pomiarowego.

Czas każdego pomiaru wynosił 64 s, natomiast częstotliwość próbkowania 65536 Hz. Aby uzyskać większą liczbę segmentów czasowych sygnał został podzielony na nakładające się na siebie odcinki. Odcinki zachodzą na siebie w 60%. W ten sposób z pomiaru trwającego 64 s uzyskano 14 dziesięciosekundowych segmentów. Sposób

podziału sygnału na segmenty czasowe przedstawiono na Rys. 1.



Rys. 1. Podział sygnału na segmenty czasowe

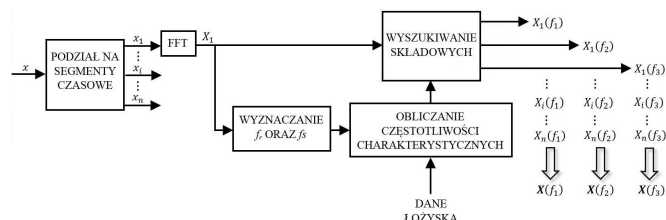
Do wyznaczenia częstotliwości charakterystycznych, dla których obliczona zostanie wartość potrójnej kowariancji niezbędna jest informacja o wartości częstotliwości sieci zasilającej oraz częstotliwości obrotowej. Częstotliwość obrotowa  $f_r$  zależy od obciążenia i częstotliwości sieci zasilającej. W prezentowanym układzie częstotliwość sieci zasilającej  $f_s$  jest wyznaczana na podstawie pomiaru częstotliwości trzeciej harmonicznej prądu, dzięki czemu błąd wyznaczania jest trzykrotnie mniejszy w porównaniu do wyznaczania częstotliwości na podstawie podstawowej harmonicznej. Częstotliwość obrotowa wału silnika wyznaczana jest na podstawie składowych w paśmie częstotliwości żłobkowych i znajomości parametrów konstrukcyjnych silnika.

Wartość częstotliwości obrotowej, częstotliwość sieci zasilającej oraz dokładne parametry geometrii łożyska posłużyły do obliczania częstotliwości charakterystycznych. Częstotliwości te są różne w zależności od rodzaju poszukiwanego uszkodzenia.

Dla każdego segmentu czasowego przebiegu, w trakcie przetwarzania sygnału obliczane są częstotliwości  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$ , które posłużą do obliczenia potrójnej kowariancji. W kolejnym kroku wynik zaokrąglany jest do części dziesiętnej ze względu na rozdzielczość widma. Dla uzyskanej w ten sposób wartości częstotliwości z widma uzyskanego z pomiarów wybierane są w jej otoczeniu dwa sąsiednie prążki w widmie: jeden z prawej, drugi z lewej strony. Spośród tych trzech prążków wyznaczany jest prążek o największej amplitudzie.

W rezultacie dla każdego segmentu czasowego otrzymano 3 wartości: amplitudę zespoloną dla częstotliwości  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$ . Częstotliwości  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$  mogą zmieniać się w czasie. W efekcie ich wartości mogą się różnić w poszczególnych segmentach czasowych, jednak różnice te powinny być niewielkie, ponieważ pomiary były przeprowadzane w stanie ustalonym, przy stałym obciążeniu. Z uwagi na to, że prędkość obrotowa oraz częstotliwość sieciowa są wyznaczane w każdym segmencie osobno przyjęto, że ich zmiany w czasie pomiaru nie mają wpływu na wyniki NTC. Wartości współczynników szeregu Fouriera dla częstotliwości  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$  dla poszczególnych segmentów czasowych tworzą 3 wektory. Zgodnie ze wzorem (1) są to wektory:  $X(f_1)$ ,  $X(f_2)$ ,  $X(f_3)$ . Otrzymane wyniki są podstawą do obliczenia potrójnej kowariancji zgodnie ze wzorem (1). Kowariancja wyznaczana jest dla każdej fazy prądu silnika według opisanej powyżej procedury. Wartość NTC stanowi średnia arytmetyczna kowariancji z każdej fazy.

Poniżej przedstawiono schemat blokowy opisanego w tym rozdziale algorytmu przetwarzania sygnału (Rys. 2.). Rezultatem działania prezentowanego algorytmu są dane niezbędne do obliczenia wartości NTC. Są to wektory  $X(f_1)$ ,  $X(f_2)$ ,  $X(f_3)$ , które zgodnie ze wzorem (1) stanowią współczynniki szeregu Fouriera z sygnału  $x$  dla wszystkich segmentów czasowych dla częstotliwości  $f_1$ ,  $f_2$  i  $f_3$ .



Rys. 2. Schemat blokowy algorytmu przetwarzania sygnału.

#### 4. WYBÓR KOMPONENTÓW

Wcześniejsze badania nad prądową diagnostyką łożysk [11][12], pozwoliły stwierdzić w widmie prądu obecność dodatkowych składowych związanych z uszkodzeniami łożysk. Częstotliwości tych składowych zostały zestawione w tabelicy 1.

Tabela 1. Częstotliwości składowych prądu silnika związane z uszkodzeniami łożysk [11][12]

| Numer składowej | Częstotliwość składowej         | Numer składowej | Częstotliwość składowej                 |
|-----------------|---------------------------------|-----------------|---|
| 1.              | $f_g + f_{def}$                 | 17.             | $f_g + 3 \cdot f_r + f_{def}$           |
| 2.              | $ f_g - f_{def} $               | 18.             | $ f_g + 3 \cdot f_r - f_{def} $         |
| 3.              | $3 \cdot f_g + f_{def}$         | 19.             | $ 3 \cdot f_g - f_r + f_{def} $         |
| 4.              | $ 3 \cdot f_g - f_{def} $       | 20.             | $ 3 \cdot f_g - f_r - f_{def} $         |
| 5.              | $5 \cdot f_g + f_{def}$         | 21.             | $3 \cdot f_g + f_r + f_{def}$           |
| 6.              | $ 5 \cdot f_g - f_{def} $       | 22.             | $ 3 \cdot f_g + f_r - f_{def} $         |
| 7.              | $ f_g - f_r + f_{def} $         | 23.             | $ 3 \cdot f_g - 2 \cdot f_r + f_{def} $ |
| 8.              | $ f_g - f_r - f_{def} $         | 24.             | $ 3 \cdot f_g - 2 \cdot f_r - f_{def} $ |
| 9.              | $f_g + f_r + f_{def}$           | 25.             | $3 \cdot f_g + 2 \cdot f_r + f_{def}$   |
| 10.             | $ f_g + f_r - f_{def} $         | 26.             | $ 3 \cdot f_g + 2 \cdot f_r - f_{def} $ |
| 11.             | $ f_g - 2 \cdot f_r + f_{def} $ | 27.             | $ f_g - f_r - f_{def} $                 |
| 12.             | $ f_g - 2 \cdot f_r - f_{def} $ | 28.             | $ 5 \cdot f_g - f_r - f_{def} $         |
| 13.             | $f_g + 2 \cdot f_r + f_{def}$   | 29.             | $5 \cdot f_g + f_r + f_{def}$           |
| 14.             | $ f_g + 2 \cdot f_r - f_{def} $ | 30.             | $ 5 \cdot f_g + f_r - f_{def} $         |
| 15.             | $ f_g - 3 \cdot f_r + f_{def} $ | 31.             | $ 5 \cdot f_g - 2 \cdot f_r + f_{def} $ |
| 16.             | $ f_g - 3 \cdot f_r - f_{def} $ | 32.             | $ 5 \cdot f_g - 2 \cdot f_r - f_{def} $ |

gdzie:  $f_g$  – częstotliwość sieci zasilającej,  $f_r$  – częstotliwość obrotowa,  $f_{def}$  – częstotliwość wibracji związana z uszkodzeniem danego elementu łożyska.

Rozważając 32 składowe i uwzględniając fakt, że zamiana miejscami pierwszego składnika z drugim nie ma wpływu na wartość NTC można uzyskać 14880 różnych kombinacji 3 spośród 32 komponentów. Spośród wszystkich kombinacji należy wybrać tę, która pozwoli uzyskać najlepsze rezultaty dla metody potrójnej kowariancji, a tym samym będzie najbardziej użyteczna do celów diagnostycznych. Jako najlepszą możliwą kombinację składowych przyjęto tę, która osiągnie najwyższą wartość według kryterium Fishera danego wzorem (2):

$$F = \frac{|m_1 - m_2|^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (2)$$

gdzie:  $m_1$  – wartość średnia NTC dla przypadków nieuszkodzonych,  $m_2$  – wartość średnia NTC dla przypadków uszkodzonych,  $\sigma_1^2$  – wariancja NTC dla przypadków nieuszkodzonych,  $\sigma_2^2$  – wariancja NTC dla przypadków uszkodzonych.

Kryterium Fishera określa jakość separacji między przypadkami uszkodzonymi a nieuszkodzonymi. Wartość

kryterium będzie wyższa, gdy różnica między wartością średnią NTC dla przypadków uszkodzonych i dla przypadków nieuszkodzonych będzie większa. Wartość kryterium Fishera będzie niższa, gdy odchylenie standardowe wartości NTC dla danej klasy łożysk (nieuszkodzonych lub uszkodzonych) będzie większe.

## 5. PODSUMOWANIE

W pierwszej części artykułu została przedstawiona tematyka badawcza, przegląd metod oraz szczegółowy opis zastosowanej metody wraz z algorytmem przetwarzania sygnałów. NTC jest metodą, która wykrywa nieliniowe zmiany wspólne dla 3 składowych sygnału dzięki czemu można ją wykorzystać do wykrywania stanów przejściowych wybranych składowych. Metoda ta bardzo dobrze nadaje się do zastosowania w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych, co zostało zweryfikowane eksperymentalnie w części artykułu.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Ciszewski T., Swędrowski L., Wołoszyk M., Ziółko M.: Porównanie wyników badań diagnostycznych łożysk silnika indukcyjnego poprzez pomiary wibracji i prądu stojana, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2012
2. Ewert P., Kowalski C.T.: Neuronowy detektor uszkodzeń łożysk tocznych, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe nr 92/2011, s. 205-210.
3. Wysogład B.: Metody diagnozowania łożysk tocznych z zastosowaniem transformacji falkowej, DIAGNOSTYKA '29 – Artykuły główne, s. 47-52.
4. Yang R., Kang J., Zhao J., Li J., Li H.: A Case Study of Bearing Condition Monitoring Using SPM, 2014 Prognostics and System Health Management Conference, Zhangjiajie, 24-27.08.2014, p. 695-698.
5. Zeari R., Ghanbarzadeh A., Attaran B., Moradi S.: Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rolling Element bearings using Continuous Wavelet Transform, 2nd International Conference on Control, Instrumentation and Automation (ICCA), Shiraz, 27-29.12.2011, p. 753 -758.
6. Gupta L.A., Peroulis D.: Wireless Temperature Sensor for Condition Monitoring of Bearings Operating Through Thick Metal Plates, IEEE Sensors Journal, Vol. 13, Issue 6, June 2013, p. 2292-2298.
7. Fidali M.: Ultradźwięki w diagnostyce i eksploatacji łożysk tocznych, Utrzymanie ruchu 1/2015, s. 56-61.
8. Rzeszucinski P., Orman M., Pinto C. T., Tkaczyk A., Sulowicz M.: A signal processing approach to bearing fault detection with the use of a mobile phone, IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Guarda, 1-4.09.2015, p. 310-315.
9. Dzwonkowski A., Swędrowski L.: Motor Bearing Diagnostics Performed by Means of Laser Vibrometer, Diagnostics for Electric Machines, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives (SDEMPED), Bologna, 05-08.09.2011, p. 482 – 486.
10. 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, Issue 1, 17.07.2009, p. 244-251.
11. Swędrowski L.: Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego, oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego, Wydawnictwo PG, Gdańsk 2005, s. 14-24.
12. Swędrowski L.: Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
13. Frosini L., Magnaghi M., Albini A., Magrotti G.: A new diagnostic instrument to detect generalized roughness in rolling bearings for induction motors, IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Guarda, 1-4.09.2015, p. 239-245.
14. Zając M., Sulowicz M.: Wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych z wykorzystaniem analizy falkowej, Politechnika Krakowska, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 4/2014 (104), s. 279-285.
15. Kowalski C.T., Orłowska-Kowalska T.: Bearing fault monitoring using neural networks, The 2001 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives. SDEMPED 2001, Grado, Italy, September 1-3, p. 313-317.
16. Corne B., Vervisch B., Derammelaere S., Knockaert J., Desmet J.: The reflection of evolving bearing faults in the stator current's extended park vector approach for induction machines, Mechanical Systems and Signal Processing 107, 2018, p. 168-182

## INDUCTION MOTOR BEARINGS DIAGNOSTIC WITH MOTOR CURRENT SIGNATURE ANALYSIS AND NORMALIZED TRIPLE COVARIANCE. PART I - NTC

One of the most popular electric machines in the world industry is an induction motor (IM). Due to simple construction its bearings are the part most susceptible to damage. Therefore, bearing diagnosis is very important in maintaining the driveline. Diagnostic of most parts of the IM through motor current signature analysis (MCSA) are already well described and used in the industry. As such, bearing diagnosis through MCSA would be very convenient from economic point of view. It would allow to reduce the cost of diagnostics through a diagnosis of all motor parts by measuring only one physical quantity. The objective of research that were carried out was to propose and test a new efficient MCSA bearings diagnostic method. The proposed method is the Normalized Triple Covariance (NTC). This higher order spectra signal processing technique is a new approach in IM bearings diagnostic with MCSA. Part I of the paper contains an introduction to the subject of bearing diagnostics, review of diagnostic methods and theoretical basis of the NTC. Part II covers experimental results of the proposed method and final conclusions.

**Keywords:** MCSA, induction motor bearings diagnostic, digital signal processing, higher order spectra.