

DIAGNOSTYKA ŁOŻYSK SILNIKA INDUKCYJNEGO POPRZEZ ANALIZĘ PRĄDU SILNIKA METODĄ NTC. CZEŚĆ II – WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

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

Badania eksperymentalne przedstawione w tej części artykułu zostały przeprowadzone dla silnika indukcyjnego (SI) Sh 80X-4C o mocy znamionowej 1,1 kW. Prezentowane badania zostały przeprowadzone przy zasilaniu sieciowym oraz przy pełnym obciążeniu silnika. Przeprowadzone badania obejmowały 42 łożyska w tym 21 łożysk nieuszkodzonych i 21 z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami. Typ badanych łożysk to 6204. W celu weryfikacji rzeczywistego stanu każdego badanego łożyska, równoległe z pomiarami prądu dokonano również pomiarów wibracji przy użyciu systemu diagnostyki wibracyjnej DREAM. Lista badanych łożysk wraz z wynikiem badania systemem DREAM została umieszczona w tablicy 1.

Tablica 1. Lista łożysk z wprowadzonymi uszkodzeniami

Nr łożyska	Wynik DREAM dla bieżni zewnętrznej	Wynik DREAM dla bieżni wewnętrznej	Wynik DREAM dla el. toczy
Uszkodzenia bieżni zewnętrznej			
1.	17%	0%	0%
2.	17%	0%	0%
3.	80%	0%	0%
4.	14%	0%	0%
5.	36%	0%	0%
6.	80%	0%	0%
7.	32%	0%	0%
8.	59%	0%	0%
9.	80%	0%	0%
10.	80%	0%	0%

Uszkodzenia bieżni wewnętrznej			
11.	0%	80%	0%
12.	0%	47%	0%
13.	0%	80%	0%
14.	0%	80%	0%
15.	0%	80%	0%
16.	0%	80%	0%
Uszkodzenia elementów toczy			
17.	0%	0%	34%
18.	0%	0%	14%
19.	0%	0%	32%
20.	0%	0%	14%
21.	0%	0%	69%
Łożyska nieuszkodzone			
22. do 42.	<5%	<5%	<5%

2. WSKAŹNIK DIAGNOSTYCZNY

W rozdziale 4 w pierwszej części artykułu przedstawiono zależności wykorzystywane w procedurze wyboru komponentów. Aby dokonać wyboru komponentów w pierwszej kolejności należy obliczyć NTC dla wszystkich możliwych kombinacji 3 spośród 32 składowych dla wszystkich wykonanych pomiarów prądu. Następnie dla danego uszkodzenia, spośród wszystkich łożysk uszkodzonych i nieuszkodzonych należy wybrać część łożysk, które posłużą do wyboru komponentów. W zestawie łożysk przyjętym do wyboru komponentów muszą znajdować się zarówno łożyska uszkodzone jak i nieuszkodzone. Zestaw łożysk do wyboru komponentów wybierany jest losowo, przy czym w skład zestawu wchodzi 50% spośród łożysk z danym typem uszkodzenia oraz 50% spośród pozostałych łożysk. Dla każdego rodzaju badanego uszkodzenia wylosowano 5 różnych zestawów do wyboru wskaźnika diagnostycznego. Dla danego zestawu łożysk obliczono wartość kryterium Fishera dla wszystkich możliwych 14880 kombinacji 3 spośród 32 rozważanych składowych diagnostycznych. W kolejnym kroku spośród 14880 kombinacji wybrano 5 kombinacji dla których wartość kryterium Fishera była najwyższa. Suma pięciu NTC dla tych pięciu kombinacji służy jako wskaźnik diagnostyczny (WD) do oceny stanu pozostałych łożysk, które nie zostały wykorzystane do wyboru komponentów. Diagnoza łożyska polega na porównaniu wartości WD z wartością obliczoną na podstawie wzoru (1).

Rezultaty badań zaprezentowano na wykresach oraz zestawiono w tabelach. Na osi poziomej wykresu zaznaczono numery kolejnych łożysk zgodnie z numeracją przyjętą w tablicy 1. Oś pionowa reprezentuje wartość WD, będącego sumą pięciu kowariancji. Do prezentacji danych na wykresach (Rys. 1, Rys. 2, Rys. 3) zastosowano następujące oznaczenia:

- krzyżyki – łożyska uszkodzone;
- okręgi – łożyska nieuszkodzone;
- pogrubiona pozioma prosta – granica pomiędzy łożyskami uszkodzonymi a nieuszkodzonymi, obliczona na podstawie łożysk z zestawu do wyboru WD, dana wzorem (1):

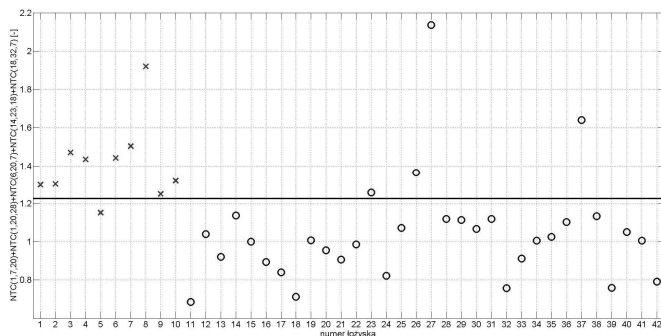
$$\frac{\frac{1}{i} \sum WD_u + \frac{1}{j} \sum WD_{nu}}{2} \quad (1)$$

gdzie: $\frac{1}{i} \sum WD_u$ – średnia wartości wskaźnika diagnostycznego dla łożysk uszkodzonych,
 $\frac{1}{j} \sum WD_{nu}$ – średnia wartości wskaźnika diagnostycznego dla łożysk nieuszkodzonych.

3. USZKODZENIA BIEŻNI ZEWNĘTRZNEJ

W tym rozdziale do obliczania wartości NTC, jako częstotliwość uszkodzenia (f_{def}) przyjęto częstotliwość charakterystyczną dla bieżni zewnętrznej. Z tego względu łożyska które posiadają inny rodzaj uszkodzenia traktowane są jako nieuszkodzone. Zgodnie z tablicą 1 do badania uszkodzeń bieżni zewnętrznej przygotowano 10 łożysk z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami, ponumerowanych od 1 do 10 oraz 32 łożyska z nieuszkodzoną bieżnią zewnętrzną, ponumerowane od 11 do 42.

Na rysunku 1 przedstawiono wykres wartości WD, który został wybrany przy pomocy zestawu numer 1 zgodnie z tablicą 2.



Rys. 1. Wartość WD wybranego na podstawie zestawu numer 1 dla poszczególnych łożysk

Na podstawie Rys. 1. można stwierdzić, że spośród łożysk nie znajdujących się w zestawie do wyboru WD, 4 z 5 łożysk uszkodzonych o numerach: 3, 4, 8, 10 zostały poprawnie zdiagnozowane, co daje 80% trafności diagnoz. W przypadku łożysk nieuszkodzonych poprawnie zdiagnozowanych zostało 13 spośród 16 łożysk, o numerach: 11, 16, 20, 24, 25, 29, 30, 31, 32, 34, 35, 38, 42, co daje 81% trafności. Trafność diagnoz dla wszystkich diagnozowanych łożysk wynosi: $17/21 = 81\%$.

Wyniki uzyskane dla wszystkich pięciu zestawów zamieszczono w tablicy 2. Wartość kryterium Fishera

prezentowana w tabeli obliczona została dla wszystkich łożysk, łącznie z łożyskami biorącymi udział w procedurze wyboru komponentów.

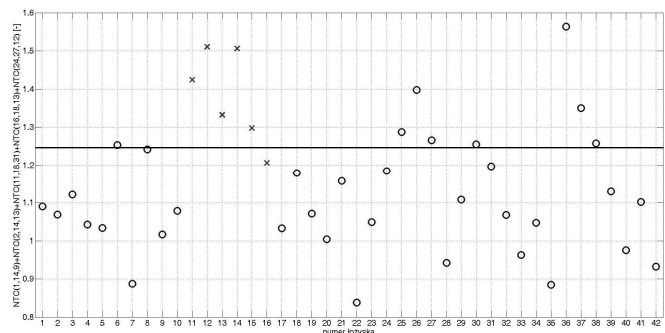
Tablica 2. Zestawienie uzyskanych wyników dla badania uszkodzeń bieżni zewnętrznej

Numer zestawu	Nr łożysk do wyboru WD		Wartość Kryterium Fishera	Trafność diagnoz dla łożysk uszkodzonych	Trafność diagnoz dla łożysk nieuszkodzonych	Trafność dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD
	Łożyska uszkodzone	Łożyska nieuszkodzone				
1.	1, 7, 6, 2, 9	28, 39, 21, 14, 13, 23, 40, 12, 19, 41, 36, 18, 22, 33, 17, 15	1,12	4/5 80%	13/16 81%	17/21 81%
2.	5, 7, 10, 8, 1	32, 13, 29, 38, 28, 30, 40, 39, 21, 17, 26, 14, 37, 23, 42, 19	1,11	4/5 80%	12/16 75%	16/21 76%
3.	8, 10, 4, 9, 2	38, 34, 25, 40, 12, 20, 18, 32, 37, 22, 16, 39, 30, 31, 28, 11	1,68	3/5 60%	12/16 75%	15/21 71%
4.	4, 1, 8, 2, 10	26, 27, 16, 24, 39, 30, 41, 37, 21, 12, 29, 42, 19, 25, 32, 38	1,56	2/5 40%	15/16 94%	17/21 81%
5.	10, 4, 8, 9, 7	14, 36, 24, 23, 22, 13, 15, 42, 26, 18, 40, 20, 32, 33, 30, 31	1,41	3/5 60%	10/16 63%	13/21 62%

4. USZKODZENIA BIEŻNI WEWNĘTRZNEJ

Do badania uszkodzeń bieżni wewnętrznej przygotowano 6 łożysk z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami, o numerach od 11 do 16 oraz 36 łożysk z nieuszkodzoną bieżnią wewnętrzną o numerach od 1 do 10 oraz od 17 do 42. Do badania uszkodzeń bieżni wewnętrznej jako częstotliwość uszkodzenia (f_{def}) przyjęto częstotliwość charakterystyczną dla bieżni wewnętrznej.

Na rysunku 2 przedstawiono rezultaty uzyskane dla WD wybranego przy pomocy zestawu numer 1 zgodnie z tablicą 3.



Rys. 2. Wartość WD wybranego na podstawie zestawu numer 1 dla poszczególnych łożysk

Na podstawie powyższego wykresu można odczytać, że wśród łożysk uszkodzonych, 2 z 3 łożysk o numerach 13 i 15 zostały zdiagnozowane poprawnie, co oznacza 67%

trafność wykrycia uszkodzenia. W przypadku łożysk nieuszkodzonych poprawnie zdiagnozowanych zostało 13 spośród 18 łożysk, o numerach: 4, 10, 18, 21, 24, 28, 32, 33, 34, 35, 39, 40, 42 co daje 72% trafności. Ogólna trafność diagnoz dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD wynosi: $15/21 = 71\%$

Trafności diagnoz dla wszystkich pięciu zestawów znajdują się w tablicy 3. Wartość kryterium Fishera obliczona została dla wszystkich łożysk, łącznie z łożyskami biorącymi udział w procedurze wyboru komponentów.

Tablica 3. Zestawienie uzyskanych wyników dla badania uszkodzeń bieżni wewnętrznej

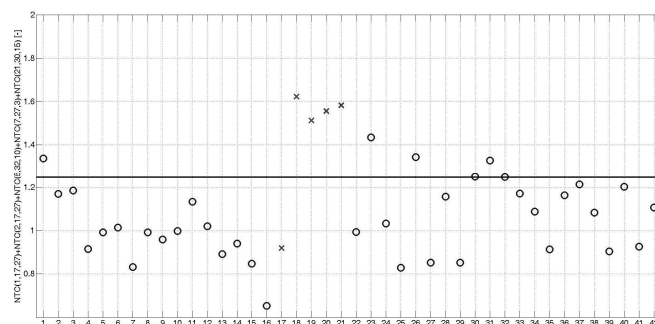
Numer zestawu	Nr łożysk do wyboru WD		Wartość Kryterium Fishera	Trafność diagnoz dla łożysk uszkodzonych	Trafność diagnoz dla łożysk nieuszkodzonych	Trafność dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD
	Łożyska uszkodzone	Łożyska nieuszkodzone				
1	14, 11, 12	19, 20, 29, 23, 41, 3, 38, 17, 22, 7, 6, 1, 8, 2, 31, 5, 9, 27	1,85	2/3 67%	13/18 72%	15/21 71%
2	15, 12, 13	29, 6, 20, 8, 22, 27, 5, 25, 9, 18, 21, 35, 39, 42, 31, 23, 2, 1	1,01	2/3 67%	14/18 78%	16/21 76%
3	16, 15, 12	8, 40, 9, 35, 24, 6, 41, 19, 30, 20, 26, 39, 22, 38, 1, 29, 23, 10	1,11	2/3 67%	13/18 72%	15/21 71%
4	15, 16, 13	26, 37, 40, 2, 32, 38, 36, 1, 3, 34, 18, 29, 24, 27, 5, 20, 25, 35	1,22	1/3 33%	15/18 83%	16/21 76%
5	14, 12, 11	37, 33, 19, 18, 20, 22, 28, 27, 1, 4, 38, 39, 8, 3, 41, 30, 31, 5	1,48	2/3 67%	13/18 72%	15/21 71%

5. USZKODZENIA ELEMENTÓW TOCZNYCH

Do badania uszkodzeń elementów tocznych jako częstotliwość uszkodzenia (f_{def}) przyjęto częstotliwość charakterystyczną dla elementów tocznych. Do badania uszkodzeń elementów tocznych przygotowano 5 łożysk z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami, o numerach od 17 do 21 oraz 37 łożysk z nieuszkodzonymi elementami tocznymi o numerach od 1 do 16 oraz od 22 do 42. W tym wypadku ze względu na nieparzystą liczbę łożysk, do wyznaczenia WD przyjęto 3 łożyska uszkodzone oraz 18 łożysk nieuszkodzonych.

Rysunek 3 zawiera wykres wartości WD wybranego przy użyciu łożysk z zestawu numer 1 zgodnie z tablicą 4. Na podstawie tego wykresu można odczytać, że spośród łożysk spoza zestawu wykorzystanego do wyboru WD 1 z 2 uszkodzonych łożysk, o numerze 18, zostało zdiagnozowane poprawnie, co oznacza 50% trafności wykrycia uszkodzenia. W przypadku łożysk nieuszkodzonych poprawnie zdiagnozowanych zostało 14 spośród 19 łożysk, o numerach: 2, 4, 5, 7, 10, 12, 22, 28, 34, 35, 37, 40, 41, 42, co daje 74% trafności. Ponadto wśród łożysk nieuszkodzonych, które nie zostały poprawnie zdiagnozowane znajduje się jedno,

o numerze 32, należące do zestawu do wyboru WD. Ogólna trafność diagnoz dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD wynosi: $15/21 = 71\%$



Rys. 3. Wartość WD wybranego na podstawie zestawu numer 1 dla poszczególnych łożysk

Wyniki badań dla wszystkich zestawów zamieszczono w tablicy 4. Wartość kryterium Fishera obliczona została dla wszystkich łożysk, łącznie z łożyskami użytymi do wyboru WD.

Tablica 4. Zestawienie uzyskanych wyników dla badania uszkodzeń elementów tocznych

Numer zestawu	Nr łożysk do wyboru WD		Wartość Kryterium Fishera	Trafność diagnoz dla łożysk uszkodzonych	Trafność diagnoz dla łożysk nieuszkodzonych	Trafność dla łożysk spoza zestawu do wyboru WD
	Łożyska uszkodzone	Łożyska nieuszkodzone				
1	20, 19, 21	39, 6, 27, 24, 25, 32, 11, 33, 13, 36, 14, 9, 38, 3, 15, 29, 16, 8	1,27	1/2 50%	14/19 74%	15/21 71%
2	19, 21, 20	11, 3, 6, 30, 29, 4, 28, 38, 16, 31, 5, 8, 26, 34, 32, 13, 2, 33	1,03	1/2 50%	18/19 95%	19/21 90%
3	20, 21, 19	31, 10, 22, 7, 6, 25, 8, 29, 26, 40, 1, 11, 16, 32, 2, 27, 38, 39	2,73	1/2 50%	15/19 79%	16/21 76%
4	19, 17, 21	31, 32, 29, 22, 37, 13, 23, 39, 26, 15, 42, 12, 5, 3, 24, 34, 35, 6	1,83	1/2 50%	16/19 84%	17/21 81%
5	20, 21, 17	14, 29, 42, 4, 40, 16, 24, 36, 26, 6, 37, 22, 28, 27, 34, 3, 33, 8	3,45	1/2 50%	17/19 89%	18/21 86%

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W części eksperymentalnej przebadano 42 łożyska pod kątem trzech rodzajów uszkodzeń. Należy przy tym zaznaczyć, że autorzy publikacji w tej tematyce zwykle prezentują wyniki dla pojedynczego przypadku. Nie ma zatem możliwości porównania uzyskanych wyników z innymi metodami prądowymi. W artykule przedstawiono wyniki badań dla trzech typów uszkodzeń: bieżni zewnętrznej, bieżni wewnętrznej oraz elementów tocznych łożysk. Średnia trafność diagnoz dla poszczególnych

przypadków wyniosła kolejno: 74,2%, 73% i 80,8%. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż NTC jest bardzo obiecującą prądową metodą diagnostyki łożysk SI. Porównując zasadę działania NTC do dotychczas badanych metod prądowych, metoda NTC powinna być bardziej skuteczna w wykrywaniu uszkodzeń we wczesnej fazie rozwoju. Zdaniem autora można uzyskać jeszcze lepsze rezultaty na przykład poprzez wydłużenie czasu pomiaru. W kolejnych badaniach warto również zbadać wpływ długości okna czasowego na trafność diagnoz. Rozwój opisanej metody i przebadanie jej działania na większej liczbie łożysk powinno w przyszłości dać bardzo duże szanse na wykorzystanie metody w przemyśle.

7. 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 (ICCIA), 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., Albin 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 II – EXPERIMENTAL RESULTS

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.