

Leon SWĘDROWSKI

POLITECHNIKA GDAŃSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI I AUTOMATYKI, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Pomiary w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych

Dr hab. inż. Leon SWĘDROWSKI

Leon Swędrowski pracę doktorską obronił w roku 1980. Od ukończenia studiów pracuje w Katedrze Metrologii i Systemów Informatycznych Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej (obecnie – kierownik Katedry). W roku 2005 uzyskał stopień doktora habilitowanego. Prodziekan Wydziału Elektrotechniki i Automatyki PG na kadencję 2008-2012. Dziedziny jego zainteresowań to pomiary wielkości nieelektrycznych metodami elektrycznymi, diagnostyka techniczna, pomiary o wysokiej dokładności.



e-mail: lswedrowski@ely.pg.gda.pl

Streszczenie

Jak wynika z szeregu badań, w silniku indukcyjnym najczęściej uszkodzeniom ulegają łożyska. W referacie omówione są badania, dotyczące diagnostyki łożysk silników z wykorzystaniem pomiarów wibracji (akcelerometrem piezoelektrycznym i laserowym) oraz prądu silnika. Są również wymienione inne sygnały, stosowane do diagnostyki łożysk. Przedstawione są wyniki dotychczasowych badań autora, świadczące o przydatności pomiarów wielkości elektrycznych w silniku do diagnostyki łożysk.

Słowa kluczowe: pomiary wibracji, pomiary prądu, diagnostyka, silnik indukcyjny, łożyska toczne.

Measurements for diagnostics of induction motor bearings**Abstract**

There can appear some damages of induction motor mechanical parts (such as bearings, rotor, shaft), or of induction motor electromagnetic system elements, for example the stator, rotor winding or the magnetic circuit. Extensive research shows that the bearings are the element most susceptible to damage. Therefore bearing diagnostics is so important in supervision of motor condition. The paper presents investigations which the author finds interesting, i.e. those concerning the diagnostics of motor bearings which utilises measurements of vibrations (by piezoelectric and laser vibrometer), motor current (MCSA) and instantaneous power consumed by the motor. The method of motor current analysis, elaborated by the author, is shown in Fig.5. Other signals used for bearing diagnostics are also mentioned in the paper. The results obtained from the objects in which bearing damage was on purpose introduced are given in this paper. Verification of the obtained results was performed through assessment of bearing condition with use of a vibration diagnostics system. There are presented the conclusions drawn from the investigations at the present stage (Figs.6 and 7), regarding usability of electric signal measurements for diagnostics of bearings. In the future the author plans reduction of the measurement system noise as well as widening the range of faults recognised by the diagnostic system. Also the reliability of diagnosis from the motor current system will be improved.

Keywords: asynchronous rotating machines, current measurements, fault diagnosis, vibration measurements, roll bearings.

1. Wprowadzenie

Najczęściej spotykaną maszyną w przemyśle jest silnik indukcyjny. Dlatego też bezawaryjna praca tych maszyn jest bardzo istotna dla ekonomii przemysłu.

W silniku indukcyjnym mogą pojawić się uszkodzenia elementów mechanicznych (jak łożyska, wirnik, wał) lub uszkodzenia elementów układu elektromagnetycznego (uzwojenia stojana, wirnika, czy obwód magnetyczny).

Jak wynika z szeregu badań, najczęściej uszkodzeniom ulegają łożyska.

2. Sygnały stosowane w diagnostyce łożysk silników

W diagnostyce łożysk wykorzystuje się: pomiary wibracji (za pomocą akcelerometrów piezoelektrycznych i laserowych), pomiary składu chemicznego smaru, pomiary temperatury, pomiary emisji akustycznej, pomiary prądu i mocy zasilania.

2.1. Pomiary wibracji (akcelerometry piezoelektryczne)

Diagnostyka łożysk metodami wibracyjnymi została dobrze opracowana zarówno od strony sprzętowej, jak i algorytmów diagnostycznych. Przy wykorzystaniu tradycyjnych akcelerometrów piezoelektrycznych ma ona jednakże jedną wadę – wymaga dostępności obiektu dla zainstalowania czujników. Wady tej nie mają wibrometry laserowe. Metodami wibracyjnymi możliwe jest wykryć i rozróżnić 12 rodzajów niesprawności łożyska. Pojedyncze uszkodzenie łożyska jest wykrywane i klasyfikowane na podstawie pomiaru amplitudy i częstotliwości nowych pojawiających się składowych w widmie drgań.

W tabelicy 1 zestawiono możliwe niesprawności łożyska i podano częstotliwości składowych widma wibracji związane z tymi niesprawnościami [1].

Tab. 1. Częstotliwości składowych widma wibracji charakterystycznych dla określonych niesprawności łożyska tocznego [1]

Tab. 1. Frequencies of vibration spectrum component characteristic for certain bearing damages

Nr	Typ uszkodzenia	Główne częstotliwości modulujące
1	Obrót wirnika dookoła zewnętrznego pierścienia	f_r
2	Niejednorodne promieniowe naprężenia w łożysku	$2f_r$
3	Nieosiowe ustawienie zewnętrznego pierścienia	$2f_{out}$
4	Zużycie zewnętrznego pierścienia	f_{out}
5	Ubytki na zewnętrznym pierścieniu	$kf_{out}; k = 1, 2, 3...$
6	Zużycie wewnętrznego pierścienia	$kf_i; k = 1, 2, 3...$
7	Wgłębienia na wewnętrznym pierścieniu	kf_{in}
8	Zużycie koszyka i elementów tocznych	f_c lub $(f_f - f_c)$
9	Wgłębienia, odpryski na elementach łożyska	kf_{rot}
10	Uszkodzenia kilku powierzchni łożyska	$f_{out} + f_{in} = nf_i$ lub $(f_r - f_c)(n + 1)$
11	Obrót pierścienia w gnieździe łożyska	$kf_i; k = 1, 2, 3...$
12	Wady smarowania	Wzrost ogólnego poziomu drgań

Częstotliwości podane w tabelicy oblicza się na podstawie znanych wymiarów geometrycznych łożyska (oraz częstotliwości wirowania wirnika f_r) gdzie: f_{out} – częstotliwość obliczana dla uszkodzeń zewnętrznego pierścienia, f_{in} – częstotliwość obliczana dla uszkodzeń wewnętrznego pierścienia, f_c – częstotliwość obliczana dla uszkodzeń koszyka, f_{rot} – częstotliwość obliczana dla uszkodzeń elementów tocznych.

2.2. Pomiary wibracji (wibrometr laserowy)

Pomiar wibrometrem laserowym nie wymaga kontaktu z badanym obiektem. Sprzęt jest jednakże bardzo drogi i brak jest doniesień o wynikach stosowania takich wibrometrów do diagnostyki łożysk.

2.3. Pomiary składu chemicznego smaru

Pomiary składu chemicznego smaru są możliwe jedynie w dużych silnikach, w których jest dostęp do środka smarnego. W zużytym smarze znajdują się zarówno cząstki pochodzące od zużycia się smaru, jak i zużycia elementów łożyska. Dokonując analizy chemicznej środka smarnego można otrzymać użyteczne informacje o stanie łożyska.

2.4. Pomiary temperatury

Pomiar temperatury jest tradycyjnym sposobem określania stanu łożysk. Poziom temperatury łożyska nie powinien przekroczyć pewnego poziomu. Odpowiednie normy określają ten poziom. Temperatura łożyska jest wypadkową szeregu zjawisk, jak: stan środka smarnego, aktualna prędkość obrotowa, temperatura uzwojeń, rozkład temperatury wewnątrz silnika.

Problemy związane z tym sposobem diagnostyki to konieczność zabudowania czujników temperatury możliwie blisko łożysk a także, po wykryciu przekroczenia, konieczność podjęcia dalszych badań dla wykrycia przyczyny wzrostu.

2.5. Pomiary emisji akustycznej

Poszczególne uszkodzenia łożyska mogą być identyfikowane poprzez pomiar emisji akustycznej. Pomiary wykonuje się mikrofonem, w paśmie 0 do 20 kHz. Jest to zjawisko dostępne również dla zmysłów ludzkich. Emisja akustyczna jest w istocie tym samym zjawiskiem, co wibracja, tylko rozchodzącym się w ośrodku gazowym.

Głównym problemem jest eliminacja zakłóceń z otoczenia. Praktycznie nie jest możliwe wykonywanie pomiarów w pomieszczeniu, gdzie blisko siebie pracuje kilka silników tego samego typu. Zaletą jest brak czujników, montowanych bezpośrednio na silniku.

2.6. Pomiary składowych prądu stojana (lub przebiegów mocy chwilowej)

Jest to bardzo atrakcyjny sposób diagnozowania silnika, ze względu na brak potrzeby montażu czujników bezpośrednio na badanym obiekcie [2, 3].

Zasada diagnostyki opiera się tutaj na założeniu, że każda wada łożyska powoduje promieniowy ruch pomiędzy wirnikiem a stojanem maszyny. Powoduje to zmiany szczeliny powietrznej maszyny w sposób, który można opisać kombinacją wirujących nieregularności w dwóch kierunkach, zgodnie i przeciwnie do kierunku wirowania wirnika. Zmiany te generują dodatkowe harmoniczne prądu stojana i mocy chwilowej.

W składowych prądu (i mocy) znajdują odbicie wszystkie najczęstsze uszkodzenia w silniku – łożysk, uzwojenia stojana i wirnika. Problemy pomiarowe związane są z niskim poziomem sygnałów diagnostycznych na tle wysokiego poziomu innych składowych, szczególnie przy diagnostyce łożysk. Powoduje to konieczność stosowania nisko-szumnych elementów na wejściu układu pomiarowego.

Podobne cechy ma metoda, oparta o pomiary i analizę przebiegów mocy chwilowej. W tej metodzie w widmie mocy pojawia się składowa o częstotliwości wibracji, której nie ma w widmie prądu. Jest to dodatkowy symptom diagnostyczny, którego przydatność jest w trakcie badań [4].

3. Porównanie stosowanych metod do pomiarów w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych

W tabelicy 2 zestawiono główne cechy stosowanych sygnałów pomiarowych w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych.

Tab. 2. Główne cechy stosowanych sygnałów pomiarowych w diagnostyce łożysk silników indukcyjnych

Tab. 2. The main features of signals used for motor bearing diagnostics

Wielkość mierzona	Zalety	Wady
Wibracja (akcelerometr piezoelektryczny)	Dużo doświadczeń, normy definiujące poziomy uszkodzeń, istniejące rozwiązania komercyjne	Koszt aparatury, konieczność montażu czujnika na obiekcie
Wibracja (wibrometr laserowy)	Pomiar nieinwazyjny	Bardzo kosztowny sprzęt, brak doświadczeń
Skład chemiczny smaru	Dostarcza bezpośrednich informacji o stanie łożyska	Badania możliwe tylko przy dostępie do środka smarnego, praktycznie tylko dla dużych silników
Temperatura	Dostępne przepisy, nieskomplikowany pomiar	Konieczność montażu czujnika na obiekcie, niejednoznaczne wyniki
Emisja akustyczna	Brak montażu czujnika na obiekcie	Konieczność zapewnienia izolacji od zakłóceń akustycznych
Prąd (moc) stojana	Brak montażu czujnika bezpośrednio na obiekcie, kompleksowe badanie różnych uszkodzeń	Trudny pomiar, metoda nadal na etapie badań

Jak wynika z tabelicy, metoda oparta o klasyczny pomiar wibracji daje nadal najbardziej wiarygodne wyniki.

W dalszej części artykułu zostaną opisane dwie metody do diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego, zdaniem autora najbardziej rokujące osiągnięcie sukcesu w badaniach bezkontaktowych.

W prezentowanych badaniach weryfikacja uzyskiwanych wyników następowała poprzez ocenę stanu łożysk za pomocą systemu diagnostyki wibracyjnej.

4. Diagnostyka łożysk w silniku indukcyjnym z wykorzystaniem wibrometru laserowego

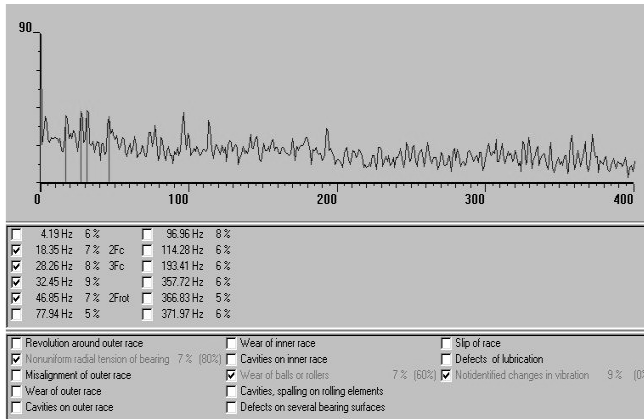
Przeprowadzono wstępne badania przydatności wibrometru laserowego do diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego [5]. Badania przeprowadzono skaningowym wibrometrem laserowym typu PSV-400 Polytec na silnikach typu STg80X-4C, o mocy 1,1 kW. W silnikach tych zainstalowane są łożyska typu 6204.

Badano silniki bez uszkodzeń oraz ze sztucznie wprowadzonymi uszkodzeniami do łożysk. Ze względu na to, że sztucznie wprowadzone uszkodzenia nie dają takiego samego obrazu drgań, jak uszkodzenia naturalne, stan uszkodzonych łożysk był badany równoległe klasycznym przyrządem do diagnostyki wibracyjnej (system DREAM), wyposażonym w akcelerometr piezoelektryczny.

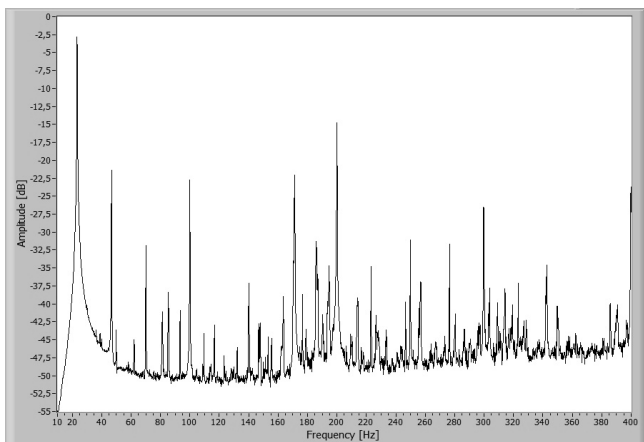
Uzyskane widma drgań z obu systemów pomiarowych były podstawą oceny przydatności systemu laserowego do diagnostyki łożysk.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wyniki pomiarów przy łożyskach nieuszkodzonych.

W widmie wibracji zarejestrowanym systemem DREAM dla łożyska bez uszkodzeń widoczne są niewielkie składowe związane z montażem łożyska i zużyciem elementów tocznych.



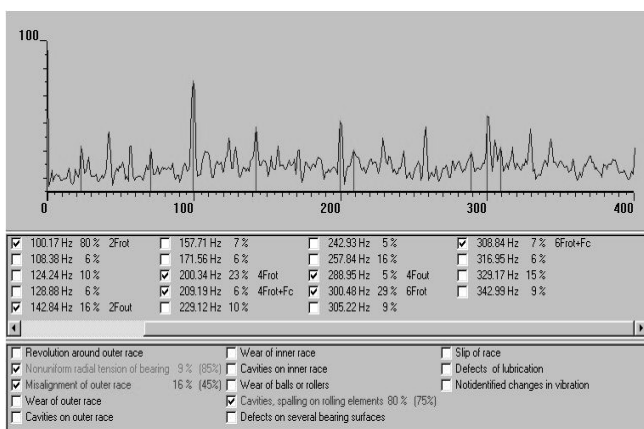
Rys. 1. Wynik diagnozy łożyska systemem DREAM (łożyska bez uszkodzeń)
Fig. 1. The result of diagnostic test of bearing by DREAM system (bearing undamaged)



Rys. 2. Widmo drgań pokrywy łożyska silnika indukcyjnego, uzyskane z wibrometru laserowego (łożyska bez uszkodzeń)
Fig. 2. The vibration spectrum of the undamaged bearing, obtained with use of a scanning laser vibrometer

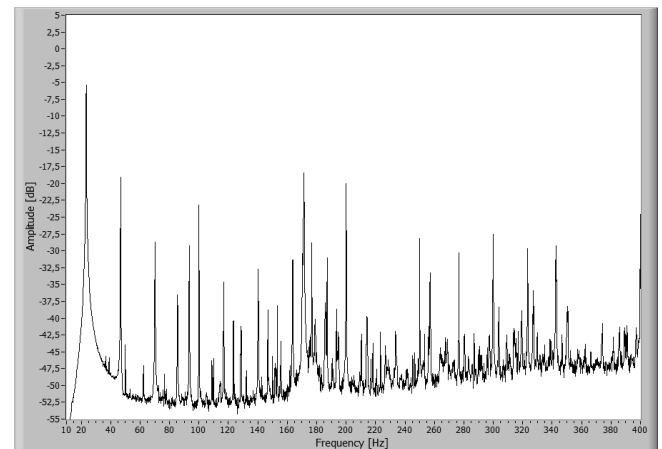
Składowe widma drgań, widoczne na rysunku 2, mają częstotliwość sieci zasilającej i jej parzystych i nieparzystych harmonicznych, a także produktów modulacji tych składowych częstotliwością obrotową wirnika.

Dalej wykonano badania silników z uszkodzeniami łożysk. Na rysunkach 3 i 4 pokazano wyniki badań dla łożyska z uszkodzonym elementem tocznym.



Rys. 3. Wynik diagnozy łożyska systemem DREAM (łożysko z uszkodzonym elementem tocznym)
Fig. 3. The result of diagnostic test of bearing by DREAM system (bearing with damage of its rolling element)

System DREAM potwierdza istnienie silnego uszkodzenia elementu tocznego.



Rys. 4. Widmo drgań pokrywy łożyska silnika indukcyjnego, uzyskane z wibrometru laserowego (łożysko z uszkodzonym elementem tocznym)
Fig. 4. The vibration spectrum of the bearing with damage of its rolling element, obtained with use of a scanning laser vibrometer

Na rysunku 4, w porównaniu z rysunkiem 1 pojawiają się nowe składowe. Ich częstotliwości są jednakże niepowiązane z częstotliwościami charakterystycznymi dla określonych uszkodzeń wibracji.

Na obecnym etapie badań można stwierdzić, że w widmie drgań mierzonych wibrometrem laserowym, przy istnieniu uszkodzenia łożyska, pojawiają się nowe składowe. Ich przydatność dla celów diagnostycznych jest problematyczna, gdyż nie można powiązać częstotliwości tych drgań z wyliczonymi częstotliwościami, charakterystycznymi dla uszkodzeń łożyska. Diagnostyka oparta o pomiary wibracji wibrometrem laserowym będzie przedmiotem dalszych badań.

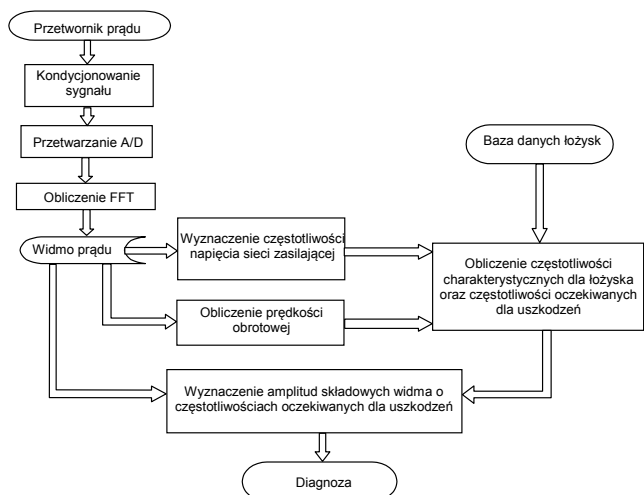
5. Diagnostyka łożysk w silniku indukcyjnym w oparciu o pomiar i analizę sygnałów elektrycznych

W Politechnice Gdańskiej prowadzone są badania przydatności sygnałów elektrycznych do diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego. Badania prowadzone są na silnikach typu STg80X-4C, o mocy 1,1 kW. W silnikach tych zainstalowane są łożyska typu 6204. Badania dotyczą wykorzystania sygnału prądu stojana oraz mocy chwilowej pobieranej przez silnik do diagnostyki.

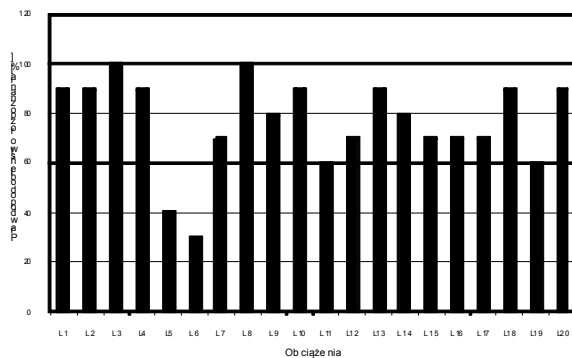
Stosowaną metodę pomiaru prądu [6] przedstawia rysunek 5.

Na podstawie badań modelu silnika indukcyjnego, a także badań silnika, w którym wprowadzono sztucznie oscylacje szczeliny powietrznej (za pomocą wzbudnika przymocowanego do silnika) stwierdzono, że wszystkie składowe częstotliwości obecne w widmie silnika bez dodatkowych wibracji mogą zostać zmodulowane częstotliwością $\pm f_w$ oraz $\pm 2f_w$, gdzie f_w jest częstotliwością oscylacji szczeliny powietrznej. Pozwala to na sprowadzenie diagnostyki do poszukiwania składowych w widmie o określonych \pm częstotliwościach.

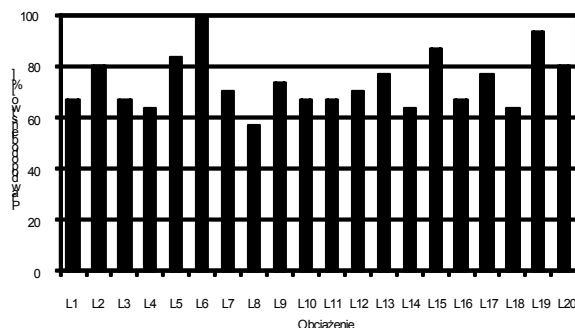
Dalej przeprowadzone zostały badania silników z łożyskami o celowo wprowadzonych uszkodzeniach. Rysunki 6 i 7 przedstawiają uzyskane w trakcie badań prawdopodobieństwa trafnego rozpoznania ogólnego stanu łożyska oraz rozpoznania rodzaju uszkodzenia w zależności od obciążenia. Stwierdzono możliwość wykorzystania analizy widmowej prądu do diagnostyki łożysk.



Rys. 5. Metoda analizy prądu silnika dla celów diagnostycznych [6]
Fig. 5. The method of motor current analysis for diagnostic purposes



Rys. 6. Prawdopodobieństwo poprawnego rozpoznania ogólnego stanu łożyska w zależności od obciążenia
Fig. 6. The probability of right distinction between faulty and faultless bearings



Rys. 7. Prawdopodobieństwo trafnego rozpoznania rodzaju uszkodzenia w zależności od obciążenia
Fig. 7. The probability of right distinction of the damage type

6. Analiza wyników badań

Amplitudy uzyskanych eksperymentalnie składowych diagnostycznych uzyskano na poziomie oczekiwanym z badań modelu matematycznego [7, 8] – w granicach od (-55) do (-90) dB w stosunku do podstawowej składowej o częstotliwości sieciowej.

Przeprowadzona analiza metrologiczna wykazała, że najwyższe niepewności pomiaru, a także największe szумы pojawiają się przy pomiarach składowych widma w przedziale częstotliwości $0 \div 100$ Hz. Poza przedziałem częstotliwości $0 \div 100$ Hz największy składnik do budżetu niepewności pomiaru wnosi przetwornik prądu. Z przeprowadzonych równoległe badań poziomu szumów poszczególnych elementów układu wynika, że jest on również głównym źródłem szumów. W następnych rozwiązaniach układu pomiarowego należy przede wszystkim poprawić właściwości tego członu toru pomiarowego.

7. Plany rozwoju systemu pomiarowego

Planowany przez autora dalszy rozwój metodyki diagnozowania łożysk silników indukcyjnych poprzez analizę prądu będzie zmierział w kierunku:

- obniżenia szumów układu pomiarowego,
- poprawy dokładności identyfikacji składowych diagnostycznych w przebiegu czasowym prądu,
- objęcia diagnostyką szerszego zakresu kontrolowanych parametrów.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w roku 2010 jako projekt badawczy nr 2389/B/T02/2010/38.

8. Literatura

- [1] Azovcev J., Barkowa N., Referowski L., Swędrowski L., Rogow S.: Application on software for rolling element bearings automatic diagnostics and condition prediction. W: Zesz. Nauk. Wydz. Elekt. P. Gdań. nr 5 (1993).
- [2] Schoen R. R., Habetler T. G., Kamran F., Bartheld R. G.: Motor bearing damage detection using stator current monitoring. IEEE vol.31, Nov/Dec (1995).
- [3] Swędrowski L.: Diagnostics measurement of current supplying an electric motor. XVII IMEKO World Congress – Metrology in the 3rd Millennium. Dubrovnik, Croatia, June (2003).
- [4] Dzwonkowski A., Swędrowski L.: The instantaneous power as a diagnostic symptom of the bearing damage. The Fifth International Conference on Condition Monitoring, CM 2008 Heriot-Watt University, Edinburgh, (2008).
- [5] Dzwonkowski A., Swędrowski L.: Laser measurements in the motor bearing diagnostics. 16th IMEKO TC4 International Symposium: "Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements", Florence, Italy, (2008).
- [6] Swędrowski L.: Sposób i układ do przeprowadzania badań silnika indukcyjnego, zwłaszcza jego łożysk tocznych. Patent P. 364252 (2009). Stack J.R., Habetler T. G., Harley R. G., Bearing fault detection via autoregressive stator current modeling. IEEE, Salt Lake City, vol.2 (2003).
- [7] Rusek J., Swędrowski L.: Induction machine model for current diagnostics of bearings. Tagungsband 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium. Ilmenau, (2003).
- [8] Swędrowski L., Rusek J.: "Model and simulation tests of a squirrelcage induction motor with oscillation of air gap", Proc. of: 5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Vienna, Austria 7-9, September. IEEE, Arsenal Research, (2005) pp. 131-136.

otrzymano / received: 01.07.2010

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2010

artykuł recenzowany