

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

MONITORING STANU TECHNICZNEGO NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH W PRZEMYŚLE – DOŚWIADCZENIA WŁASNE

MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF ELECTRICAL DRIVES IN THE INDUSTRY – OWN EXPERIENCE

Abstract: Most commonly, industrial plants use a system of period diagnostic measurements of off-line and on-line rolling bearings carried out cyclically according to a certain schedule. Motors, particularly important in critical drives, are more frequently included in vibration monitoring. We can distinguish: protection monitoring systems; prediction monitoring systems; and systems combining both of these features. According to the author, systems provided by Brüel & Kjaer, SKF and SPM are worth particular attention among systems monitoring condition of rotating machines, including rolling bearings. These are the most popular systems in Europe. In his article, the author presents his experience in the use of monitoring systems in local industrial plants.

1. Wstęp

Współcześnie w okresie stale rosnących wymagań wobec wydajności oraz redukcji kosztów produkcji w przemyśle, koniecznością staje się właściwa diagnostyka maszyn. Często uszkodzenia niewielkich elementów napędowych skutkują znacznymi stratami wynikającymi z nieprzewidzianego zatrzymania procesu produkcyjnego oraz nieplanowych prac remontowych. Diagnostyka maszyn oraz monitorowanie parametrów ich pracy pozwala uniknąć skutków awarii, właściwie zaplanować okresy przeglądów i remontów maszyn, oraz znacznie wydłużyć czas eksploatacji maszyn. Organizacyjna i finansowa atrakcyjność diagnostyki maszyn elektrycznych oraz ciągły postęp w elektronice cyfrowej i dostępność do niej, zachęcają do konstruowania nowej aparatury do diagnostyki i monitoringu tych maszyn [12].

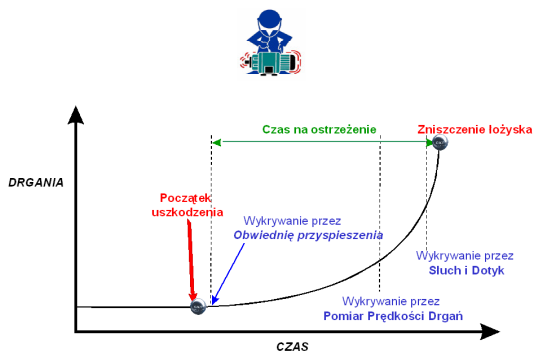
2. Eksploatacja maszyn w przemyśle

Maszyny przemysłowe tworzą coraz to bardziej złożone zespoły, towarzyszy temu coraz intensywniejsza produkcja przemysłowa i eksploatacja maszyn, często 24 godziny na dobę, czyli w ruch ciągłym. Podstawowym zadaniem stawianym inżynierom jest ciągły wzrost wydajności maszyn. Wzrostowi wydajności powinno towarzyszyć zwiększenie starań o zapewnienie pełnej sprawności urządzeń. Trzeba to pogodzić ze stale malejącą liczebnością personelu odpowiedzialnego za utrzymanie ruchu i serwis maszyn. W ujęciu ogólnym silniki indukcyjne trójfazowe klatkowe, podstawowe maszyny

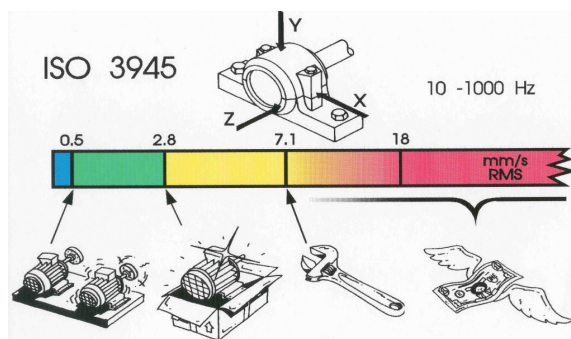
napędu przemysłowego, podobnie jak i inne maszyny można eksploatować na 3 sposoby [1÷7, 12]:

1. Eksploatacja do wystąpienia awarii.
2. Eksploatacja planowo-zapobiegawcza.
3. Eksploatacja zależna od stanu maszyny.

W metodzie eksploatacji silników zależnej od ich stanu technicznego każdy silnik traktowany jest w sposób indywidualny. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, tylko uwarunkowany stanem technicznym danej maszyny. Remont silnika przeprowadzamy tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne silników, określa się ich stan techniczny, indywidualnie dla każdego silnika. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić początek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian. Przykładowo mogą to być łożyska silnika – rys.1. Ocenę aktywności drganiowej silnika można wykonać w oparciu o stosowne obowiązujące normy – rys.2, lub w oparciu o sprawdzone i zalecane kryteria [12]. Wyniki pomiarów drgań można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania silnika, w tym przypadku ze względu na uszkodzenie łożyska – rys.3 i rys. 4. Analizując wyniki pomiarów, obok określenia terminu koniecznego zatrzymania ze względu na stan techniczny, można określić zakres remontu, przewidzieć i zaplanować z wyprzedzeniem czasowym stronę techniczną oraz ekonomiczną remontu.



Rys. 1. Wynik pomiaru drgań węzła łożyskowego przykładowego silnika w napędzie prądu przemiennym, idea diagnostyki drganiowej stanu technicznego łożyska tocznego w silniku [4÷6]

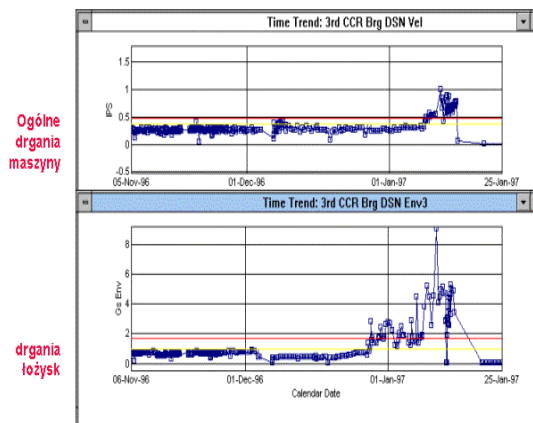


Rys. 2. Norma ISO 3945, wytyczne eksploatacyjne odniesione do wartości skutecznej prędkości drgań w zakresie częstotliwości (10÷1000 Hz) – V_{RMS} [4÷6]

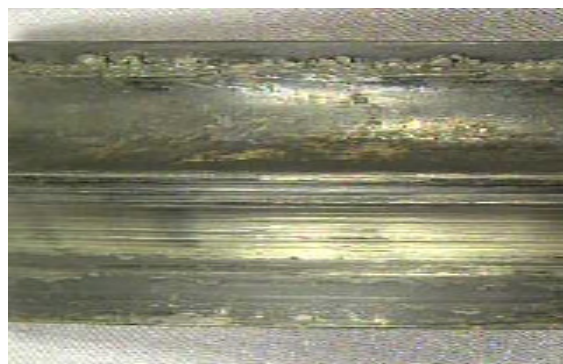
$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V(t)^2 dt}, \quad (1)$$

gdzie: V_{RMS} - wartość skuteczna prędkości drgań w określonym przedziale częstotliwości,
 T - przedział czasu, dla którego określa się V_{RMS} ,
 czas całkowania,
 $V(t)$ - prędkość drgań, sygnał prędkości drgań.

Eksplatacja silników zależna od ich stanu technicznego jest strategią prowadzenia eksploatacji maszyn technicznie i ekonomicznie najkorzystniejszą, coraz częściej stosowaną w krajowych zakładach przemysłowych i w energetyce. W gospodarce krajów zachodnich jest strategią dominującą. Strategia ta obok korzyści ekonomicznych typu: wydłużenie okresów międzyremontowych, zwiększenie niezawodności maszyn, zwiększenie wydajności, eliminacji niepotrzebnych wymian podzespołów,



Rys. 3. Trend zmian drgań dla przykładowego silnika



Rys. 4. Fragmenty bieżni zewnętrznej i wewnętrznej uszkodzonego łożyska

skrócenie czasu napraw, zmniejszenie kosztów magazynowych, wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadre techniczne. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [11, 12]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [11, 12], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania.

3. Systemy pomiarów diagnostycznych

W zakładach przemysłowych najbardziej rozpowszechniony jest system okresowych pomiarów diagnostycznych łożysk tocznych off-line i on-line prowadzonych cyklicznie wg harmonogramu, który obejmuje:

- pomiary drgań węzłów łożyskowych i całego napędu,
- pomiary temperatury w węzłach łożyskowych,
- ocenę stanu smarowania łożysk.

Pomiary wykonują najczęściej specjaliści z wydziałów diagnostyki lub innych wydziałów utrzymania ruchu. W ocenie własnej najlepszymi metodami diagnozowania łożysk tocznych w silnikach elektrycznych w warunkach krajowych są:

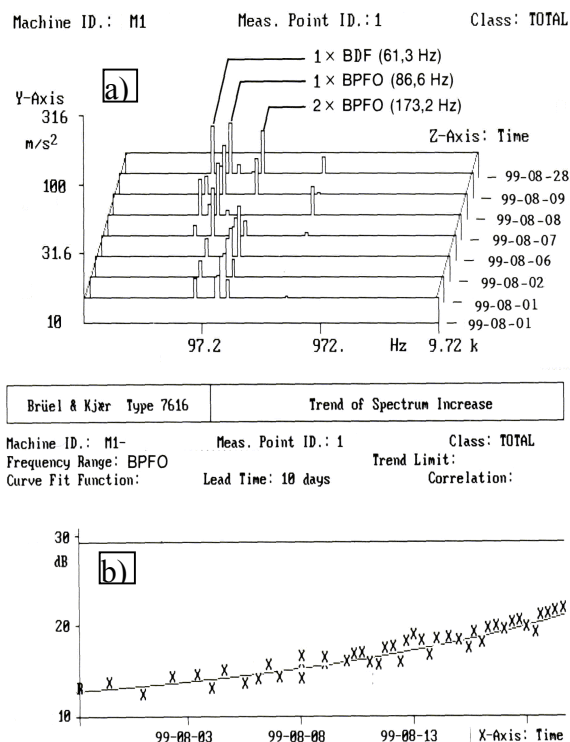
- metoda detekcji obwiedni, w tym metoda zmodyfikowana [4÷6, 12],
- metoda SPM pod warunkiem specjalnego przygotowania punktu pomiarowego [12].

W krajach o bardzo wysokiej kulturze technicznej metody wymienione wyżej są uzupełniane metodami wysokoczęstotliwościowymi – SE, SEE, HFD, EA. W urządzeniach przemysłowych wyprodukowanych przez firmy amerykańskie można spotkać wyposażenie węzłów łożyskowych w czujniki drgań do metody RE-BAM. Wszystkie wymienione metody mogą być z dobrym skutkiem wykorzystane pod warunkiem właściwego przygotowania punktów pomiarowych. Zasady wykonywania pomiarów diagnostycznych oraz stosowne kryteria oceny stanu technicznego łożysk tocznych w oparciu o wymienione metody autor przedstawił w monografii [12]. Stosowanie tych metod wymaga posiadania sprzętu pomiarowego typu analizator drgań wraz ze specjalistycznym oprogramowaniem. Sprawdzenie stanu technicznego łożysk tocznych polega na porównaniu bieżących pomiarów z pewnym poziomem odniesienia oraz poziomem granicznym określonym jako maksymalny dopuszczalny. Niestety w wielu krajowych zakładach przemysłowych, zwłaszcza w tych mniejszych, pomiary diagnostyczne łożysk tocznych w silnikach elektrycznych sprowadzają się do oceny łożysk w oparciu o ogólne wytyczne norm drganiowych dla silników (pomiary prędkości drgań do 1 kHz). Postępowanie takie uniemożliwia racjonalną eksploatację silników, nie daje możliwości wczesnego wykrycia anomalii w pracy łożysk.

4. Monitoring stanu łożysk w silnikach elektrycznych

Silniki szczególnie ważne zwłaszcza w napędach krytycznych coraz częściej objęte są monitoringiem drganiowym. Wyróżnić można; układy monitoringu zabezpieczającego, układy monitoringu predykcyjnego oraz układy łączące te obydwa cechy. W ocenie własnej na szczególną uwagę wśród systemów monitorujących stan maszyn wirujących, w tym stan łożysk

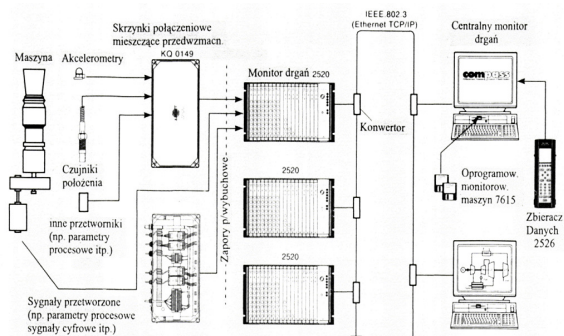
tocznych w silnikach elektrycznych zasługują systemy firm; Brüel & Kjaer, SKF i SPM. Są to systemy najbardziej rozpowszechnione w Europie. Również w kraju cieszą się dużym uznaniem. Na uwagę w ocenie autora zasługują również urządzenia monitorujące krajowej firmy SENSOR. Układy przemysłowe do monitorowania drgań maszyn wirujących w tym silników elektrycznych można spotkać od lat 70-tych ubiegłego wieku [3÷7]. Historycznie pierwszym przenośnym systemem monitorującym stan łożysk tocznych, pracującym do chwili obecnej w niektórych krajowych zakładach przemysłowych był i jest system na bazie oprogramowania firmy Brüel & Kjaer typu 7616. Autor miał i ma możliwość korzystania z tego systemu. System funkcjonuje od 1986 roku, wykorzystuje pomiarowo jeden lub kilka analizatorów drgań typu 2515. Program 7616 kontroluje i porządkuje dane pomiarowe uzyskane z analizatorów drgań, ostrzega o wykrytych zmianach w analizowanych widmach maszyn oraz pozwala na przewidywanie wystąpienia awarii. Procedurą podstawową jest porównywanie zmierzonych widm o szerokości pasma 6% i 23% z widmem odniesienia określonym przez użytkownika (n.p. dla $t=0$, początek użytkowania maszyny) w celu wczesnego wykrycia uszkodzenia. Widma odniesienia mogą być zapamiętywane dla różnych warunków pracy diagnozowanych maszyn. W czasie porównywania widm następuje automatyczna korekta związana z nierównomiernością obrotów maszyny. Od roku 1989 analizator 2515 jest wzbogacony w opcji o detekcję obwiedni. Można przyjąć, że jest to początek monitorowania łożysk tocznych przy wykorzystaniu techniki detekcji obwiedni [3÷7]. Od roku 1991 z oprogramowaniem WT9324 o nazwie: operator danych stanu maszyn, istnieje możliwość analizy w systemie widm o stałej bezwzględnej szerokości pasma. Na rys 5 dla łożyska 6326 pokazano w przykładowym silniku wyniki pomiarów uzyskane i analizowane przy udziale systemu monitoringu Brüel & Kjaer typu 7616+2515. Łożysko ma uszkodzenie elementów tocznych (BDF) oraz bieżni zewnętrznej (BPFO). Na rys. 5a pokazano widmo przyspieszenia drgań zorientowane na diagnostykę łożyska w okresie czasu 28 dni. Wyraźnie widać jak z upływem czasu wzrastają składowe wyniki z uszkodzenia łożyska; BDF i BPFO.



Rys. 5. Wyniki pomiarów drgań w monitoringu łożyska 6326 w przykładowym silniku: a) widma drgań, b) trend pasma obejmującego składową BPFO

Na rys. 5b przedstawiono trend zmian poziomu przyspieszenia drgań pasma obejmującego składową łożyskową BPFO. Alarm ustawiono z wyprzedzeniem na wartość $30-1=29$ dB, liczony wg kryterium autora [12]. Po przekroczeniu wzrostu poziomu o 14,5 dB (połowa wartości alarmowej) zwiększono częstotliwość pomiarów. W pierwszej połowie października 1999 zdecydowano się na wymianę łożyska. W czasie wymiany w pełni potwierdził się bardzo zły stan techniczny łożyska w silniku. Kolejnym ważnym systemem przenośnym (od końca 1986 roku) był i jeszcze jest system monitorowania firmy Brüel & Kjaer oparty o oprogramowanie WT 9124 oraz dwukanałowe analizatory w czasie rzeczywistym (typu 2032/34) wykorzystujące FFT oraz rejestratory (zbieracze danych). W odróżnieniu od systemów 7616 i WT9324, które do diagnozowania oprócz widm amplitudowych, sygnałów czasowych, wykorzystywały funkcję cepstrum, system WT 9124 umożliwia wykorzystanie dodatkowo funkcji wyliczanych przez analizatory dwukanałowe w czasie rzeczywistym – korelację, koherencję, gęstości prawdopodobieństwa,

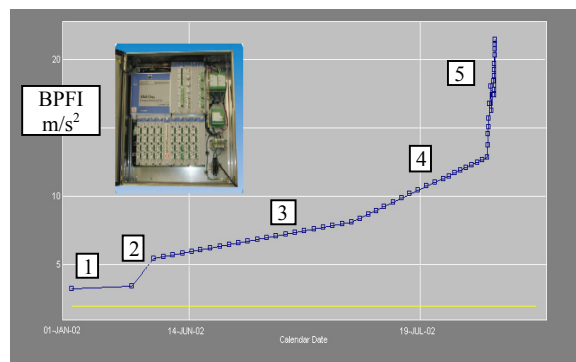
funkcje przejścia. Było to swego rodzaju nowum. Wyraźnie poszerzyły się możliwości diagnozowania maszyn w tym silników. Równolegle rozwijane są systemy wielokanałowe dla całych przemysłowych linii produkcyjnych. System 3550 wzbogacono o możliwość śledzenia technologicznych parametrów procesowych, rozbiegów i wybiegów. Od roku 1992 w przemyśle światowym, w najbardziej nowoczesnych, newralgicznych jego gałęziach między innymi na platformach wiertniczych, pojawia się system do monitorowania firmy Brüel & Kjaer COMPASS (COMputerized Predication Analysis & Safety System) – Kompleksowy Komputerowy System Prognozowania, Analizy i Zabezpieczenia typ 3540. Zapewnia on monitorowanie zabezpieczające i predykcyjne praktycznie wszystkich spotykanych w przemyśle maszyn wirujących w tym silników elektrycznych i ich łożysk tocznych. Na rys. 6 przedstawiono schemat blokowy systemu COMPASS. System obejmuje monitorowanie on-line przy pomocy stałych czujników drgań i zmiennych procesowych, jak i pomiary przy użyciu zbieraczy danych. Aby zapewnić maksymalną czułość na niewielkie nawet zmiany



Rys. 6. Schemat blokowy systemu monitorowania COMPASS [7]

stanu technicznego monitorowanych maszyn, w systemie wprowadzono tzw. adaptacyjną strategię monitorowania [8]. Wiąże ona pomiary stanu technicznego maszyn ze zmianami ich stanu pracy i warunków eksploatacji. Mierzone są prędkości obrotowe oraz tzw. fazy dla danej składowej z widma drgań – kąty pomiędzy znacznikami na wałach wirujących maszyn oraz położeniem maksimów w sygnale drganiowym dla danej składowej. Dzięki temu można wykrywać np. początki pęknięcia wałów przez stwierdzenie wystąpienia anomalii w pomiarach fazy dla składowych obrotowych (zmiana fazy w związku ze zmianami sztywności). W syste-

mie COMPASS w ciągu zaledwie paru milisekund wszystkie nastawy pomiarowe; rodzaj pomiaru, limity alarmów, nastawy przekaźników itd. potrafią się automatycznie zmienić, dopasowując strategię monitorowania do nowych warunków pracy. System zapamiętuje wszystkie sytuacje awaryjne, uzupełniając na bieżąco swoją bazę wiedzy. COMPASS umożliwia monitoring stanu technicznego łożysk tocznych w oparciu o pomiary drgań bezwzględnych oraz diagnostykę łożysk ślizgowych w oparciu o pomiar drgań bezwzględnych oraz względnych. W ocenie autora najintensywniej rozwijane są systemy monitoringu obejmujące swym zasięgiem jeden zespół maszynowy, jeden napęd. Obok wymienionych już pomiarów drgań całego napędu, pomiarów temperatur w ważnych punktach napędu w tym w węzłach łożyskowych, pomiarów prądu, systemy mają możliwość monitorowania stanu technicznego łożysk tocznych z wykorzystaniem metody SPM lub metody detekcji obwiedni. Na rys. 7. przedstawiono wyniki monitoringu stanu łożyska baryłkowego 22244 w przykładowym silniku. Jest to trend składowej łożyskowej BPFi (uszkodzenie bieżni wewnętrznej), sygnał przyspieszenia drgań, detekcja obwiedni, $BPFi=89,51$ Hz, filtr $\Delta f=0,03$ Hz, monitoring firmy SKF, Multilog. W okresie 52000 godzin pracy łożyska, na rys. 7 pokazano trend BPFi za ostatnie 4300 godzin pracy. Jest to bardzo ciekawy wykres. Charakter zmian wartości składowej BPFi od $0,69$ m/s^2 do $21,8$ m/s^2 (wzrost o 30 dB) można aproksymować 5 liniami prostymi i przewidzieć czas koniecznej wymiany łożyska (np. wykorzystując kryterium autora). Na charakterystyce nie ma obszaru typu wzrost wykładniczy. W ocenie autora taki liniowy charakter zmian wartości mierzonych ma miejsce bardzo często, znacznie częściej niż zmiany o charakterze wykładniczym. Jest to widoczne dopiero wtedy, gdy pomiary wykonuje się odpowiednio często właśnie w ostatniej „fazie życia” maszyn. Określenie granic stanów eksploatacyjnych maszyn, w ocenie autora, powinno być wykonane indywidualnie dla każdej maszyny. Przewidywanie przyszłej zmiany stanu maszyn na podstawie dostępnych symptomów diagnostycznych określane jako prognozowanie stanu, jest elementem tego procesu. Zagadnienie prognozowania stanu maszyn przedstawiono w literaturze [1, 9]. Zasadą prognozowania jest możliwość obliczenia następnym wartości elementu szeregu czasowego

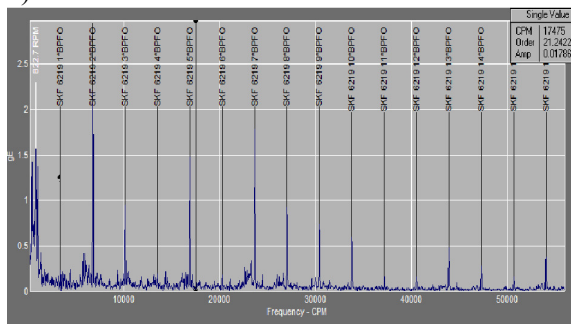


Rys. 7. Trend składowej BPFi dla łożyska 22244 w przykładowym silniku

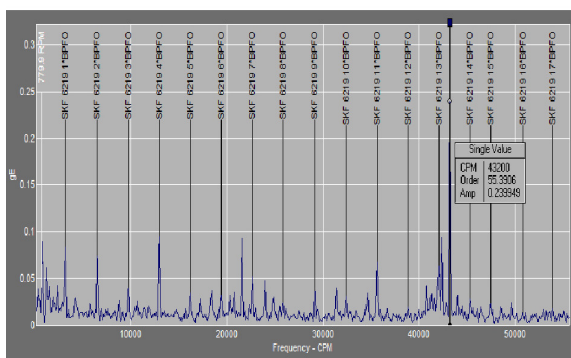
(symptomy diagnostyczne) na podstawie znajomości wartości elementów szeregu z przedziału czasu dostępnego, wykorzystując pewne formalne zależności lub zbiór tych zależności. Niezbędne jest dysponowanie modelem trendu symptomu. Teoretycznie model może być dowolnie skomplikowany. W przemysłowych systemach monitoringu silników w oparciu o pomiary drgań, uwzględniając realia pomiaru, walory aparatury, wyniki wcześniejszych badań eksperymentalnych, prawie w 100% (ocena autora) przyjmuje się, że procesy zużywania się maszyn przebiegają jednostajnie. Przyjmuje się, że trend symptomu jest prostą funkcją rosnącą monotonicznie np. liniowo (najczęściej) lub eksponencjalnie. Przykładem niech będzie najpopularniejszy obecnie w kraju system diagnozowania i monitoringu firmy SKF, wykorzystujący oprogramowanie PRISM, Machine Analyst, przy współudziale analizatorów typu Microlog oraz urządzeń Multilog (rys. 7). Autor uważa, że w ogromnej większości przypadków dla prostych układów napędowych, zwłaszcza wolnoobrotowych (prędkości do 1000 obr/min) można stosować układy monitoringu w których pomiar dla poszczególnych kanałów odbywa się na zasadzie multipleksowania (pomiar po kolei dla każdego kanału z osobna). W złożonych układach napędowych, zwłaszcza w szybkoobrotowych, pomiar w poszczególnych kanałach powinien odbywać się równocześnie. Na rys. 9 przedstawiono przykładowe wyniki monitorowania napędu przemysłowego z silnikiem o prędkości obrotowej 1480 obr/min, mającym łożysko 6219, silnik zasilany z falownika. Łożyska w silniku stalowe, tarcze nie izolowane. Do monitorowania wykorzystano najnowszy system mierzący i analizujący sygnały we wszystkich 24 kanałach jednocześnie w zakresie częstotliwości $0\div 40$ kHz. System monitoru-

jący wykrył już po miesiącu eksploatacji uszkodzenie łożyska spowodowane przepływem przez nie prądu. Po 7 miesiącach uszkodzenie było na tyle poważne że łożysko należało wymienić.

a)



b)



c)



Rys. 8. Detekcja obwiedni przyspieszenia drgań dla łożyska 6219, poziom składowej BPF0 świadczy o uszkodzeniu pierścienia zewnętrznego na skutek przepływu prądu przez łożysko a) widmo drgań po miesiącu eksploatacji, b) widmo drgań po 7miesiącach eksploatacji, c) widok zdemontowanego łożyska

Literatura

- [1]. Batko W.: *Metody syntezy diagnoz predykcyjnych w diagnostyce technicznej*. ZN, AGH, seria Mechanika, nr 4, 1984, Kraków.
- [2]. Bendat J. S., Piersol A. G.: *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*. PWN, Warszawa, 1976.
- [3]. Brown D.N., Jorgensen J.C.: *Machine – condition monitoring using vibration analysis. A case study from a Petrochemical Plant*. Application notes BO 0163-11.
- [4]. Brüel & Kjær: *Machine Condition Monitoring*. Application notes BR 0267-13.

[5]. Brüel & Kjær: *Systematic Machine Condition Monitoring*. Application notes BO 0299-11.

[6]. Brüel & Kjær: *Machine Condition Monitoring using Vibration Analysis*. Application notes BO 0247-11.

[7]. Brüel & Kjær: *Condition Monitoring Systems Division: Compass*. Application notes BP 1053-13.

[8]. Cempel Cz. *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 1985.

[9]. Cholewa W.: *Systemy doradcze*. Wyd. Ergonomiar, Gliwice 1988, Materiały Konferencyjne str.135-145, III Konferencja Naukowo-Techniczna Metrologia w energetyce, Świnoujście 11-15.04.1988.

[10]. MMuszyńska A.: *Misalignment and shaft crack – related phase relationships for 1X and 2X vibration components of rotor responses*. Orbit, Volume 10, No. 2, September 1989, pp. 4-8.

[11]. SStone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.

[12]. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z.193. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2006.

[13]. TECHNICAD; *TNC 2010 aparatura do nadzoru maszyn wirnikowych*. Nota Aplikacyjna, Gliwice 2000.

Autor

Dr hab. inż. Sławomir Szymaniec prof. PO.
Politechnika Opolska.

Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki.

Instytut Układów Elektromechanicznych
i Elektroniki Przemysłowej.

45-951 Opole ul. Luboszycka 7.

s.szymaniec@po.opole.pl

Artykuł napisano w ramach realizacji projektu RPOP.01.03.01-16-003/10-00 „Nowoczesna eksploatacja, diagnostyka, monitoring i serwis łożysk tocznych w napędach elektrycznych – laboratorium Instytutu Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej w Opolu. Projekt finansowany przez Unię Europejską, w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Opolskiego na lata 2007-2013 i Politechnikę Opolską.