

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

MONITORING STANU TECHNICZNEGO ZESPOŁÓW MASZYNOWYCH W PRZEMYSŁE – DOŚWIADCZENIA WŁASNE

MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF MACHINE UNITS IN THE INDUSTRY – OWN EXPERIENCE

Abstract: Wyróżnić można; układy monitoringu zabezpieczającego, układy monitoringu predykcyjnego oraz układy łączące te obydwie cechy. W ocenie autora na szczególną uwagę wśród systemów monitorujących stan maszyn wirujących, w tym stan łożysk tocznych zasługują systemy firm; Brüel & Kjaer, SKF, BENTLY NEVADA i SPM. Są to systemy najbardziej rozpowszechnione w Europie. W artykule autor przedstawia swoje doświadczenia w stosowaniu systemów monitoringu w krajowych zakładach przemysłowych.

Abstract: 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, BENTLY NEVADA 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.

Słowa kluczowe: eksploatacja, zespół maszynowy, stan techniczny, diagnostyka, monitorowanie.
Keywords: exploitation, machine units, technical condition, diagnostic, monitoring.

1. Wstęp

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 zespołów maszynowych oraz ciągły postęp w elektronice i dostępność do niej, zachęcają do konstruowania nowej aparatury do diagnostyki i monitoringu tych maszyn [1÷5].

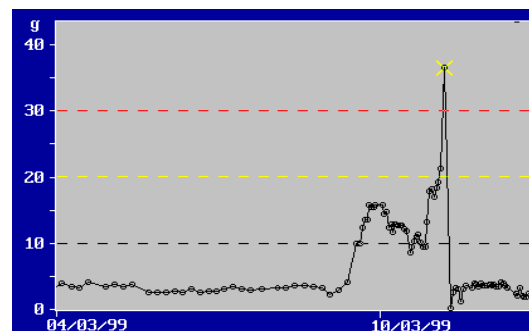
2. Eksploatacja maszyn w przemyśle

W ujęciu ogólnym zespoły maszynowe można eksploatować na 3 sposoby [1÷5]:

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

W metodzie eksploatacji zależnej od ich stanu technicznego każdy zespół maszynowy traktowany jest w sposób indywidualny. Czas remontów nie jest z góry sztywno zaplanowany, tylko uwarunkowany stanem technicznym zespołu maszynowego. Remont przeprowadzamy tylko wtedy, gdy jest on konieczny. Wcześniej systematycznie wykonuje się pomiary diagnostyczne, określa się stan techniczny zespołu maszynowego, indywidualnie. Dzięki pomiarom diagnostycznym można stwierdzić począ-

tek pojawienia się uszkodzenia, a następnie obserwować jego rozwój, określać trend zmian – rys.1. Ocenę aktywności drganiowej zespołu maszynowego można wykonać w oparciu o stosowne obowiązujące normy, lub w oparciu o sprawdzone i zalecane kryteria [5]. Wyniki pomiarów drgań można ekstrapolować w celu przewidzenia terminu koniecznego zatrzymania zespołu maszynowego. 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. Wyniki pomiarów przyspieszenia drgań w monitoringu łożyska 6326 w przykładowym silniku, idea diagnostyki drganiowej stanu technicznego łożyska tocznego w silniku [5]

Eksploracja zespołów maszynowych 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 wymusza stały postęp techniczny zwłaszcza w obszarze podnoszenia poziomu wiedzy przez kadrę techniczną. Nieuchronne są przy tym koszty na organizację i utrzymanie na dobrym poziomie służb diagnostycznych [1÷5]. Korzyści ekonomiczne z prowadzenia diagnostyki technicznej w danym zakładzie, jak dowodzi praktyka przemysłowa [5], wyraźnie przewyższają koszty jej stosowania.

3. Systemy pomiarów diagnostycznych

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

- Pomiar drgań węzłów łożyskowych i całego zespołu maszynowego.
- Pomiar 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 warunkach krajowych są:

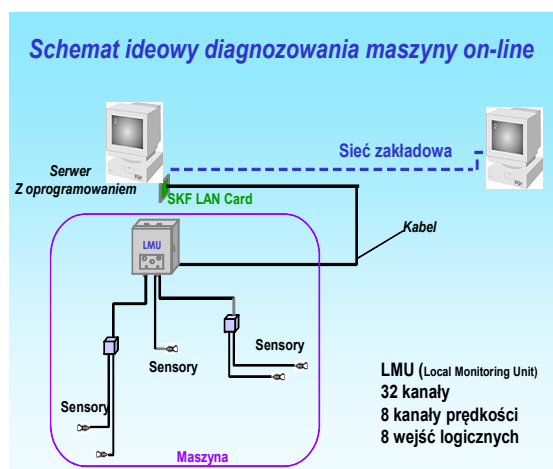
- Metoda detekcji obwiedni, w tym metoda zmodyfikowana [5].
- Metoda SPM pod warunkiem specjalnego przygotowania punktu pomiarowego [5].

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 REBAM. 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 [5]. 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 określanym jako maksymalny dopuszczalny. Niestety w wielu krajowych zakładach przemysłowych, zwłaszcza w tych mniejszych, pomiary diagnostyczne łożysk tocznych sprowadzają się do oceny łożysk tocznych w oparciu o ogólne wytyczne norm drganiowych dla maszyn (pomiar prędkości drgań do 2 kHz). Postępowanie takie uniemożliwia racjonalną eksploatację maszyn, nie daje możliwości wczesnego wykrycia anomalii w pracy maszyn.

4. Monitoring stanu technicznego zespołów maszynowych

Zespoły maszynowe szczególnie ważne zwłaszcza w napędach krytycznych coraz częściej objęte są monitoringiem drganiowym. Wyróżnić można; układy monitoringu zabezpieczającego, układy monitoringu predykcyjnego oraz układy łączące te obydwie cechy. W ocenie własnej na szczególną uwagę wśród systemów monitorujących stan maszyn wirujących, zasługują systemy firm; Brüel & Kjaer, SKF, BENTLY NEVADA 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 i TECHNICAD. Ideę diagnozowania maszyn on-line na przykładzie aparatury firmy SKF przedstawiono na rys. 2.



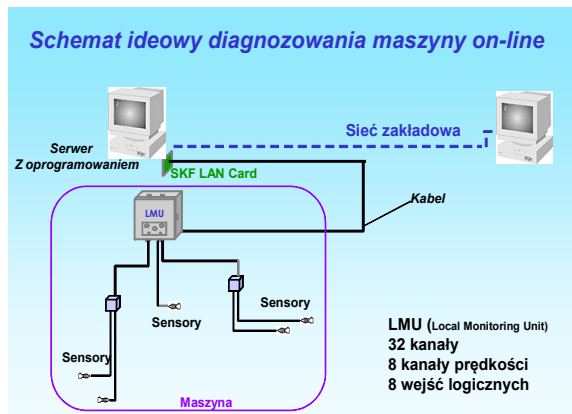
Rys. 2. Idea diagnozowania maszyn on-line na przykładzie aparatury firmy SKF [4, 5]

Systemami monitoringu szczególnie przydatnymi do diagnostyki łożysk ślizgowych są

układy pomiarowe wykorzystujące pomiary drgań względnych. Wymienić tu można układy krajowej firmy TECHNICAD [6] i amerykańskiej firmy BENTLY NEVADA [5]. Systemy te są szczególnie popularne w krajowych elektrowniach w monitorowaniu stanu turbozespołów. 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. 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.3. Na rys. 4. przedstawiono ideę diagnozowania



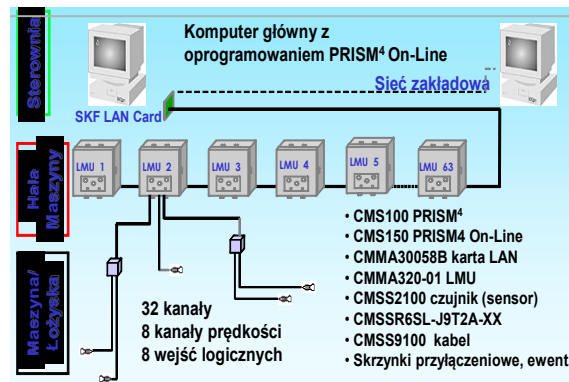
Rys. 3. System monitoringu Multilog firmy SKF [4, 5]



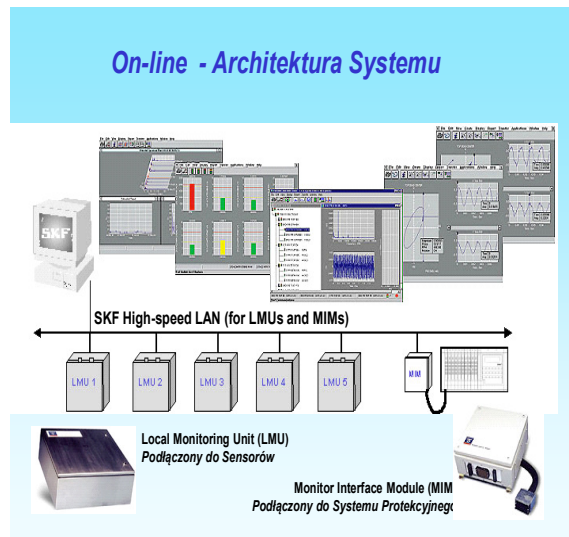
Rys. 4. Idea diagnozowania maszyn on-line na przykładzie jednej maszyny w danym zakładzie przemysłowym wg SKF [4, 5]

na przykładzie jednej maszyny, a na rys. 5 na przykładzie wielu maszyn wg

SKF w danym zakładzie przemysłowym [4, 5]. Architektura systemu diagnozowania maszyn on-line wg SKF graficznie przedstawiono na rys. 6.



Rys. 5. Idea diagnozowania maszyn on-line na przykładzie wielu maszyn w danym zakładzie przemysłowym wg SKF [4,5]

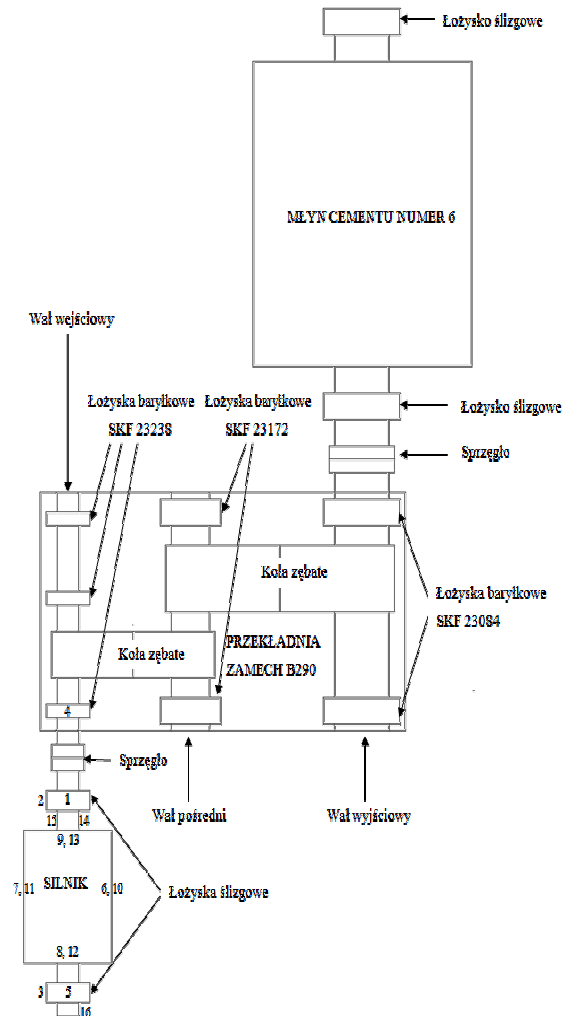


Rys. 6. Architektura systemu diagnozowania maszyn on-line wg SKF [4, 5]

W przemyśle zachodnim i krajowym coraz częściej można spotkać urządzenie do monitoringu ciągłego wyprodukowane przez firmę SKF MasCon48 współpracujące z oprogramowaniem @ptitude Observer. MasCon48 jest jednostką pomiarową umieszczoną w szczelnej obudowie (IP66) służącą do monitoringu ciągłego maszyn pracujących w trudnych warunkach przemysłowych. System jest wyposażony w 32 wejścia analogowe lub wibracyjne, lub w kombinację 24 wejść analogowych i 8 wibracyjnych. Dzięki specjalnym przełącznikom każde z wejść można odpowiednio skonfigurować w zależności od mierzonego sygnału (przemieszczenie, prędkość, przyspieszenie itp.). Za pomocą 16 ka-

nałów cyfrowych może być mierzona prędkość. Urządzenie pozwala na jednoczesny pomiar wszystkich kanałów do częstotliwości 2 kHz, zaś pomiary z dwóch kanałów do częstotliwości 40 kHz. Maksymalna rozdzielczość to 6400 linii. Dla każdego z punktów pomiarowych można indywidualnie zaprogramować wartości ostrzegawcze i alarmowe zależne od wartości, prędkości obrotowej lub obciążenia. System może pracować w sieci LAN z innymi urządzeniami jak komputery, drukarki czy serwery. Urządzenie jest wyposażone w system samodiagnozy, którego zadaniem jest kontrolowanie kabli, czujników, systemów elektronicznych oraz wykrywanie ich uszkodzeń, zwarć oraz zakłóceń sygnału. Wykrycie usterki powoduje wyzwolenie specjalnego alarmu lub restart systemu [4]. Program @ptitude Observer może także współpracować z urządzeniami przenośnymi, np. z analizatorem PerCon. Przenośny analizator PerCon pozwala na równoczesny pomiar drgań w trzech kierunkach, wyniki pomiarów są zapisywane w pamięci wewnętrznej urządzenia. Wyniki są ukazywane w postaci widma częstotliwościowego na ekranie urządzenia. Pomiar może być wykonywany w zakresie częstotliwości od 0÷10 Hz do 0÷10 kHz, przy rozdzielczości od 400 do 6400 linii. Urządzenie pozwala na pomiar detekcji obwiedni oraz badanie rozbiegów i wybiegów maszyny. Zaletami tego systemu są trwałość, niezawodność oraz łatwość obsługi. Dzięki urządzeniu można przeprowadzać wyważanie jedno lub dwupłaszczyznowe. Dzięki opcji analizy prądowej silnika można wykonać pomiar oraz analizę pracy silników i generatorów, która pozwala na wczesne wykrycie uszkodzeń tych urządzeń [5]. Innym urządzeniem służącym do monitoringu maszyn w przemyśle z którym autor ma do czynienia na co dzień w zaprzyjaźnionej cementowni jest SKF Multilog On-line System IMx-S. Jest to wysokiej klasy stacjonarny analizator służący do diagnostyki ciągłej (on-line), wyposażony w 16 wejść analogowych i 8 cyfrowych z możliwością jednoczesnego pomiaru wszystkich kanałów do częstotliwości 40 kHz. 4 kanały cyfrowe służą do pomiaru wszystkimi standardowymi impulsatorami, zaś kolejne 4 z impulsatorami sygnału prostokątnego w zakresie wyzwalania 12÷24 V. Analizator posiada również indywidualne zasilanie 24 V, maksymalnie 40 mA/kanał. Każdy z kanałów posiada trzy zaciski przyłączeniowe: P – zasilanie, A – sygnał oraz B – masa. Ponadto

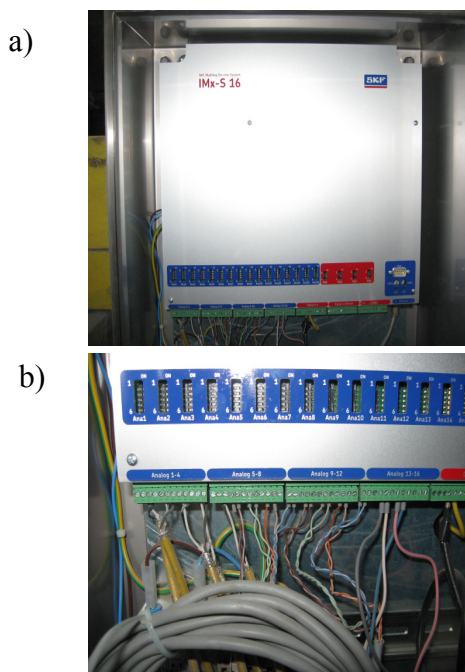
każdy z kanałów analogowych został wyposażony w 6 przełączników miniaturowych (DIP), które są ustawiane w zależności od badanego sygnału z czujnika [4, 5]. Na rys. 7 przedstawiono schemat napędu jednego z młynów cementu, na którym zainstalowano wspomniany system.



Rys. 7. Schemat napędu młyna cementu oraz rozmieszczenie czujników na diagnozowanych elementach napędu odpowiednio: 1 – 5 – akcelerometri CMSS-2200, 6 – 9 – czujniki do pomiaru temperatury Pt-100, 10 – 13 – czujniki wilgotności HIH-4000, 14, 15 – czujniki wiropądowe Technicad MDS10/MDT10, 16 – znacznik fazy Technicad MDS10/MDT10 [5]

Do wyboru są: akcelerometr ICP (z wewnętrzną elektroniką, zasilaną z urządzenia), sygnał napięciowy, sygnał prądowy (4÷20 mA), B – czujnik (wyjście 4÷20 mA), sonda wiropądowa (-24 V) oraz dzielnik napięcia. Kanały cyfrowe posiadają zaś po 4 przełączniki miniaturowe (DIP), dzięki którym możemy mierzyć sygnał

z impulsatora dwużyłowego (tacho) (24 V z zasilaniem wewnętrznym), impulsatora trzyżyłowego (tacho) NPN (24 V z zasilaniem wewnętrznym), impulsatora trzyżyłowego (tacho) PNP (24 V z zasilaniem wewnętrznym), impuls 12-24 V (zasilanie zewnętrzne) oraz impuls TTL (zasilanie zewnętrzne) [4, 5]. System monitoringu SKF Multilog On-line System IMx-S – rys.8, daje możliwość pomiaru i analizy dowolnego sygnału diagnostycznego towarzyszącego pracy maszyn, dostępnego tak w postaci analogowej, jak i cyfrowej.



Rys. 8. System monitoringu SKF Multilog on-line, System IMx-S, a) wygląd zewnętrzny, b) widok od środka [4, 5]

Współcześnie system diagnostyki maszyn w danym, dobrze i nowocześnie zarządzanym zakładzie przemysłowym, jest systemem zintegrowanym. Obejmuje system pomiarów prowadzonych aparaturą przenośną, przy pomocy prostych mierników (obchodowy), przenośnych analizatorów – zbieraczy danych (wykwalifikowany personel) oraz system pomiarów on-line, monitoring, wykorzystujący aparaturę stacjonarną. W postaci graficznej uproszczonej przedstawiono to na rys. 9. System ten może być rozbudowany o bezprzewodowy przekaz sygnałów. Ilustruje to rys. 10.



Rys. 9. Uproszczony schemat ideowy zintegrowanego systemu diagnostyki w danym zakładzie przemysłowym wg SKF [4, 5]

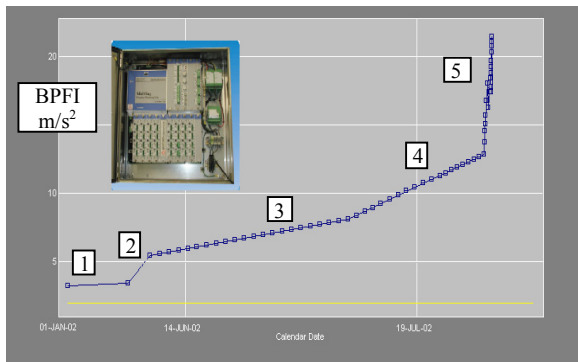


Rys. 10. Uproszczony schemat ideowy zintegrowanego systemu diagnostyki w danym zakładzie przemysłowym rozbudowany o bezprzewodowy przekaz sygnałów wg SKF [4]

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. 11 przedstawiono przykładowe 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. 11 pokazano trend BPFI za ostatnie 4300 godzin pracy. Jest to bardzo ciekawy wykres. Charakter zmian wartości składowej BPFI od $0,69 \text{ m/s}^2$ do $21,8 \text{ m/s}^2$ (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 określanych jako prognozowanie stanu, jest elementem tego procesu. Zasadą prognozowania jest możliwość obliczenia następnycy wartości elementu



Rys. 11. Trend składowej BPF1 dla łożyska 22244 w przykładowym silniku

szeregu czasowego (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. Autor uważa, że w ogromnej większości przypadków dla prostych zespołów maszynowych, zwłaszcza wolnoobrotowych (prędkości do 1000 obr/min) można stosować układy monitoringu, w których pomiar dla poszczegól-

nych 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.

Literatura

- [1]. Brüel & Kjær: *Machine Condition Monitoring*. Application notes BR 0267-13.
- [2]. Brüel & Kjær: *Systematic Machine Condition Monitoring*. Application notes BO 0299-11.
- [3]. Brüel & Kjær: *Machine Condition Monitoring using Vibration Analysis*. Application notes BO 0247-11.
- [4]. SKF.: *Integrated Condition Monitoring 2014*
- [5]. 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.
- [6]. 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
Katedra Elektrowni i Systemów Pomiarowych.
45-758 Opole ul. Prószkowska 76
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.