



mgr inż. elektryk Włodzimierz Gwiżdż
 JASTRZĘBSKA SPÓŁKA WĘGLOWA S.A.
mgr inż. mechanik Dariusz Lisowski
 GRUPA MARAT

Wibrodiagnostyka maszyn wolnoobrotowych

Streszczenie: *Wibrodiagnostyka maszyn wolnoobrotowych wymaga szczegółowej analizy tego trudnego tematu oraz wyboru odpowiedniej metody i oprzyrządowania. Autorzy przedstawiają problem na przykładzie badań przeprowadzonych w przemyśle wydobywczym. Ponadto nawiązuje się spostrzeżenie, najprawdopodobniej wynikające ze współpracy mechaniczno-elektrycznej autorów, że metody dedykowane do analizy drgań np. łożysk nadają się również do analizy problemów w silnikach elektrycznych.*

Vibrodiagnostics of slow-speed machines

Summary: *Vibrodiagnostics of slow-speed machines requires a detailed analysis of this difficult topic and selection of appropriate methods and instrumentation. The authors present a problem for the example of research carried out in the mining industry. In addition begs the observation that the methods dedicated to vibration analysis, eg. bearings are suitable for analysis of the problems in electric motors.*

WPROWADZENIE

Wibrodiagnostyka jest powszechnie stosowanym elementem systemów do obserwacji eksploatacji maszyn. Urządzenia przetwarzające drgania i akcelerometry są powszechnie dostępne, a ich zastosowanie określają normy i różne metody określane przez producenta konkretnego rozwiązania. Coraz częściej producenci maszyn dostarczają użytkownikom niezbędne informacje pomagające zaprogramować urządzenia monitorujące pracę maszyny. Nie należy jednak zapominać, że obowiązująca norma PN-ISO 10816 operuje na wartościach ogólnych pomiarów z ograniczonego zakresu częstotliwości 10 Hz - 1 kHz, dodatkowo pomiary obarczone są wpływem drgań środowiskowych. Jeżeli dodatkowo uwzględnimy parametry powszechnie stosowanych przetworników i akcelerometrów, np. akcelerometrów o czułości 100 mV/g zauważymy, że w pewnych zakresach częstotliwości wibrodiagnostyka wymaga zastosowania odpowiednich urządzeń do akwizycji pomiarów oraz zaawansowanych metod interpretacji danych. Szczególnym przypadkiem maszyn, które wymagają zastosowania odpowiednich technik są maszyny wolnoobrotowe, których prędkość obrotowa mieści się w zakresie kilkudziesięciu obrotów na minutę.

BADANIA WIBRODIAGNOSTYCZNE

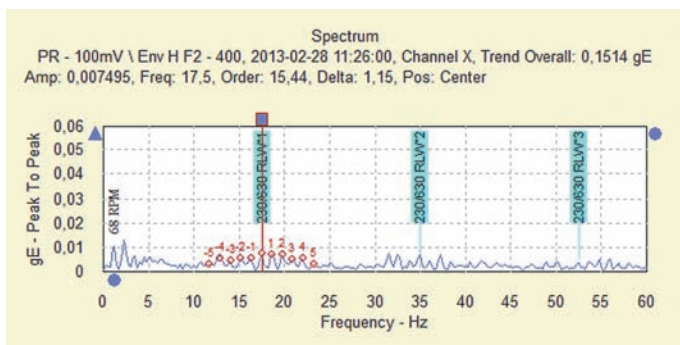
Wibrodiagnostyka maszyn wolnoobrotowych z uwagi na charakter ich pracy napotyka na specyficzne trudności:

- niskie amplitudy sygnałów często na poziomie 0,5% zakresu pomiarowego akcelerometrów,
- niskie częstotliwości charakterystyczne elementów maszyny, np. poniżej kilku Hz, często w zakresie poza liniową charakterystyką akcelerometrów i poza zakresem rozpatrywanym przez normę ISO 10816,
- krótkotrwałe warunki stabilnej prędkości obrotowej, np. kilkunastosekundowe utrudniające analizę widmową.

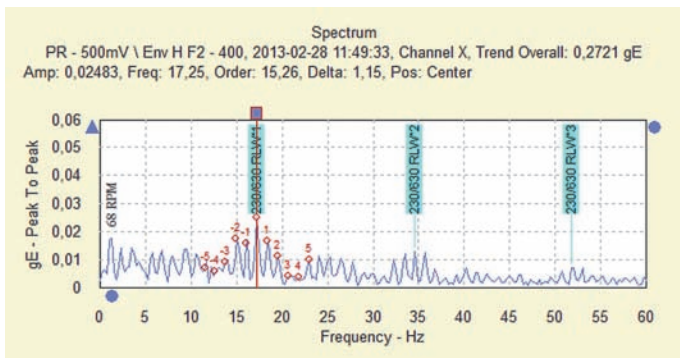
Szczególnie ostatnia przedstawiona trudność wymusza odpowiednie zaplanowanie pomiarów. Dla zilustrowania zagadnienia przyjmijmy maszynę obracającą się z prędkością 67 obr/min podpartą łożyskami tocznymi, napędzaną silnikiem podpartym na łożyskach ślizgowych. Punkt pomiarowy skonfigurowany do analizy widma drgań z zakresu częstotliwości zgodnego z ISO 10816, 1600 linii, 2 uśrednienia, wymaga 3,2 sekundy stabilnej prędkości obrotowej. Punkt skonfigurowany do obserwacji łożysk tocznych w zakresie 200 Hz, pozostałe parametry j/w, wymaga już 16 sekund stabilnej prędkości obrotowej. Natomiast próba dokładnej obserwacji zjawisk związanych z częstotliwością obrotową, np. łożysk ślizgowych w zakresie do 20 Hz wymaga już zmiany pozostałych parametrów, w przeciwnym przypadku czas potrzebny na zebranie użytecznego pomiaru wynósłby nawet 160 sekund. Korekta liczby linii na 1 Hz umożliwia uzyskanie czasu próbkowania na poziomie 20 sekund. Konieczne staje się dostosowanie parametrów określających dokładność pomiaru do czasu utrzymywania się stabilnej prędkości obrotowej maszyny.

Kolejny problem związany jest z niskimi amplitudami rejestrowanych sygnałów. Podczas analizy widmowej stwarza to ryzyko błędów w interpretacjach związanych z pobudzeniem błędnych częstotliwości, np. harmonicznych lub wstęp bocznych, dlatego korzystniejsze jest użycie akcelerometrów niskoczęstotliwościowych o wysokiej czułości.

Trudności ilustruje porównanie wyników zarejestrowanych w tym samym punkcie pomiarowym maszyny przez różne typy akcelerometrów (rys. 1, 2, tab. 1) w omawianym przykładzie, szczególnie w zakresie 0-10 Hz, gdzie znajduje się osiem harmonicznych prędkości obrotowej, przez to utrudnione jest poszukiwanie typowych problemów związanych np. z osiowością napędów, luzami mechanicznymi itp.



Rys. 1. Widmo obwiedni przyspieszenia zarejestrowanej przez akcelerometr o czułości 100 mV/g, zaznaczona częstotliwość 17,5 Hz BPF łozyska ze wstęgami bocznymi



Rys. 2. Widmo obwiedni przyspieszenia zarejestrowanej przez akcelerometr o czułości 500 mV/g, zaznaczona częstotliwość 17,5 Hz BPF łozyska ze wstęgami bocznymi

Łatwo udowodnić, że dobór właściwych elementów jest niezbędny do wykonania prawidłowych pomiarów.

Kolejnym istotnym elementem jest użycie odpowiednich metod analizy do interpretacji pomiarów drgań różnych części maszyny. Warto zwrócić uwagę, że spośród bogatej oferty rynkowej tylko niektóre metody oferują analizę w oparciu o najnowsze osiągnięcia nauki w zakresie wibrodiagnostyki. Przykładem mogą być opatentowane metody analizy obwiedni

przyspieszenia (Acceleration Enveloping [gE]), która pozwala na obserwację niekorzystnych zjawisk już na wczesnym etapie ich rozwoju w łożyskach i obwiedni emisji akustycznej (Acoustic Emission Enveloping [aeE]), których istotną cechą jest m.in. filtrowanie sygnału w celu wyselekcjonowania zakresów częstotliwości właściwych dla łożysk oraz przydatnych do oceny jakości smarowania.

Tabela 1

Porównanie pomiarów wykonanych w tym samym punkcie pomiarowym przez dwa akcelerometry o różnych parametrach

Wielkość mierzona	Czułość akcelerometru		Różnica procentowa pomiędzy pomiarami
	100 mV/g	500 mV/g	
Amplituda obwiedni przyspieszenia częstotliwości 17,5 Hz tj. defektu bieżni wewnętrznej (BPF)	0,008 gE	0,025 gE	212,5%
Amplituda przyspieszenia częstotliwości 1,134 Hz tj. prędkości obrotowej (68 obr/min)	0,06 g	0,012 g	400%

Testy prowadzone w celu optymalizacji konstrukcji przyczyniły się do rozwoju wibrodiagnostyki w tym szczególnym obszarze. Chronione patentami rozwiązania powodują, że nowe i pozornie podobne urządzenia wibrodiagnostyczne różni aż kilkadziesiąt lat w zakresie zaimplementowanych metod diagnostycznych. Zrozumiałe jest więc zróżnicowanie dostępnych rozwiązań urządzeń wibrodiagnostycznych i wielkie różnice w jakości ich pracy.

Typowym przedstawicielem nowoczesnych rozwiązań diagnostycznych do monitorowania stanu maszyn on-line jest system diagnostyczny Multilog IMx-S (CMON 2002) współpracujący z oprogramowaniem @ptitude Observer wiodącego producenta i właściciela patentów najnowszych metod wibrodiagnostycznych. Urządzenie pracuje w oparciu o jednostkę centralną składającą się z dwóch kart, tj. procesorowej oraz wejścia/wyjścia. Najważniejszą cechą CMON 2002 jest przetwarzanie sygnałów po stronie sprzętowej a nie programowej. Urządzenie po jednorazowym zaprogramowaniu wykonuje pełną analizę widma FFT oraz monitoruje zaprogramowane częstotliwości np. elementów maszyny lub silnika. Ogranicza to rolę doświadczonego diagnosty do minimum oraz zapewnia informację o defektach maszyny niemal błyskawicznie od wystąpienia zdarzenia. Oprogramowanie diagnostyczne służy do szczegółowej obserwacji rejestrowanych parametrów oraz zapewnia szereg narzędzi pozwalających na przeprowadzenie dokładnej analizy. Oszczędność czasu potrzebnego na osiągnięcie wniosków uzyskiwana jest poprzez jednorazowe dokładne odwzorowanie

geometrii elementów biorących udział w ruchu obrotowym, tj. elementów łożyskowych, kół zębatach czy liczby łopat wirnika a skończywszy na prętach klatki wirnika i złobkach w stojanie silnika. Dzięki ciągłemu pomiarowi prędkości obrotowej urządzenie samodzielnie przelicza częstotliwości poszczególnych części maszyn. Urządzenie posiada 16 lub 32 kanały analogowe, które można skonfigurować do współpracy z akcelerometrami, czujnikami przemieszczenia oraz różnorodnymi czujnikami w standardach ±25 V, 4-20 mA itd. Uzupełnieniem jest 8 lub 16 kanałów cyfrowych, które mogą być konfigurowane do pomiaru prędkości obrotowej, cyfrowych stanów procesowych lub służyć do wyzwiania czynności. Sygnały analogowe przetwarzane są poprzez 24-bitowe przetworniki A/C, pracujące w zakresie od DC do 40 kHz. W trybie współpracy z akcelerometrem możliwości konfiguracyjne pozwalają na uwzględnienie szeregu parametrów łącznie z korektą czułości wynikającą np. z certyfikatów konkretnych egzemplarzy. W przypadku, gdy urządzenie współpracuje ze stanowiskiem diagnostycznym, operator ma możliwość skonfigurowania pulpitu na wzór systemów SCADA. Przykładem jest stanowisko operatorskie na stacji prób dynamicznych przekładni zębatach.

Trudności w stosowaniu wibrodiagnostyki w maszynach wolnoobrotowych przedstawia przypadek uszkodzenia łożysk maszyny wyciągowej. Przedmiotem badań było łożysko toczne baryłkowe serii 230/630 CAK/C3 zabudowane na wale bębna pędnego maszyny wyciągowej. Średnica wału to 630 mm. Prędkość obrotowa 67 obr./min. Badania były wykonywane przy użyciu przenośnego analizatora Microlog CMXA 75, w którym oprócz standardowych technik zaimplementowana jest m.in. metoda analizy obwiedni przyspieszenia. W momencie rozpoczęcia badań stan awaryjny łożyska był Kopalni już znany, istotne było ustalenie możliwości dalszej pracy do czasu dostawy nowego egzemplarza. Pomiar drgań wykonano na opravach łożysk w trzech osiach przy użyciu akcelerometrów o czułości 100 mV/g i 500 mV/g. Pomiar przewidziane do oceny stanu łożyska wykonano w strefie obciążenia łożyska. Parametry pomiarowe ustalono z uwzględnieniem specyfiki pracy maszyny wyciągowej, tj. krótkotrwałego okresu stabilnej prędkości obrotowej. Dostosowano zakres częstotliwości i rozdzielczość, skonfigurowano filtry metody obwiedni przyspieszenia. Dokonano obliczenia częstotliwości drgań poszczególnych elementów badanego łożyska.

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \cdot \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cdot \cos \phi\right) \cdot f_r =$$

$$= \frac{28}{2} \cdot \left(1 - \frac{72}{778,5} \cdot \cos 7^\circ 54'\right) \cdot \frac{67}{60} =$$

$$= 14,201 \text{ Hz}$$

$$BPFI = \frac{Nb}{2} \cdot \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cdot \cos \phi\right) \cdot f_r =$$

$$= \frac{28}{2} \cdot \left(1 + \frac{72}{778,5} \cdot \cos 7^\circ 54'\right) \cdot \frac{67}{60} =$$

$$= 17,065 \text{ Hz}$$

$$BSF = \frac{Pb}{2 \cdot Bd} \cdot \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right)^2 \cdot (\cos \phi)^2\right) \cdot f_r =$$

$$= \frac{778,5}{2 \cdot 72} \cdot \left(1 - \left(\frac{72}{778,5}\right)^2 \cdot (\cos 7^\circ 54')^2\right) \cdot \frac{67}{60} =$$

$$= 5,986 \text{ Hz}$$

$$FTF = \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cdot \cos \phi\right) \cdot \frac{f_r}{2} =$$

$$= \left(1 - \frac{72}{778,5} \cdot \cos 7^\circ 54'\right) \cdot \frac{67}{120} =$$

$$= 0,507 \text{ Hz}$$

gdzie:

- BPFO – częstotliwość defektu bieżni zewnętrznej,
- BPFI – częstotliwość defektu bieżni wewnętrznej,
- BSF – częstotliwość defektu elementu tocznego,
- FTF – częstotliwość defektu koszyka,
- Nb – liczba elementów tocznych,
- Bd – średnica elementu tocznego,
- Pd – średnica podziałowa łożyska,
- fr – liczba obrotów łożyska na sekundę,
- ∅ – kąt oddziaływania między elementem tocznym a bieżnią.

W czasie badań wykonano 4 pomiary uszkodzonego łożyska w lutym, marcu, kwietniu i w lipcu 2013 r. oraz jeden porównawczy po wymianie łożyska w lipcu 2013 r.

Z uwagi na specyfikę maszyny nie wykonano oceny zgodnie z normą PN-ISO 10816 (rys. 3 – rejestrowane wartości byłyby wtedy interpretowane jako dobre). Porównanie trendu zmian pomiarów obwiedni przyspieszenia (rys. 4) dowodzi pogarszającego się stanu łożyska. Do momentu wymiany łożyska zmiana trendu zachowała charakter liniowy.

Tabela 2

Porównanie zarejestrowanej prędkości drgań dwóch akcelerometrów, pomiar: luty 2013 r.

Kierunek	Prędkość drgań [mm/s]	
	Akcelerometr	
	100 mV/g	500 mV/g
H	0,367	0,431
V	0,294	0,286
A	0,451	0,355

Tabela 3

Porównanie zarejestrowanej obwiedni przyspieszenia dwóch akcelerometrów, pomiar: luty 2013 r.

Kierunek	Obwiednia przyspieszenia [gE]	
	Akcelerometr	
	100 mV/g	500 mV/g
H	0,151	0,272
V	0,258	0,291
A	0,270	0,144

Tabela 4

Porównanie wyników z kolejnych pomiarów zarejestrowanej prędkości drgań, akcelerometr 500 mV/g

Kierunek	Prędkość drgań [mm/s]			
	03.2013	04.2013	07.2013 – przed wymianą	07.2013 – po wymianie
H	0,477	0,396	0,464	0,077
V	0,263	0,261	0,320	0,093
A	0,421	0,372	0,411	0,172

Tabela 5

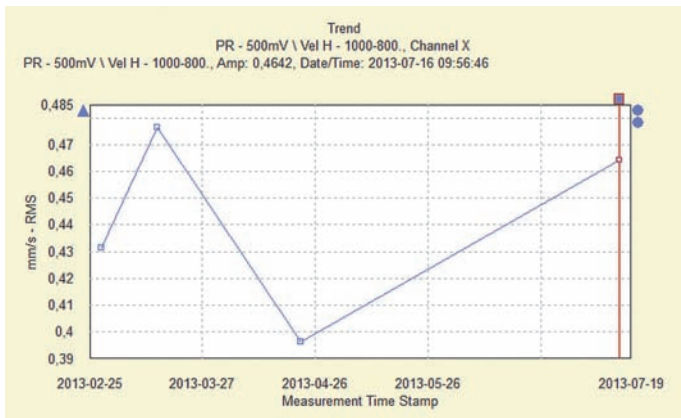
Porównanie wyników z kolejnych pomiarów zarejestrowanej obwiedni przyspieszenia, akcelerometr 500 mV/g

Kierunek	Obwiednia przyspieszenia [gE]			
	03.2013	04.2013	07.2013 – przed wymianą	07.2013 – po wymianie
H	0,285	0,330	0,403	0,024
V	0,274	0,290	0,304	0,036
A	0,175	0,157	0,195	0,032

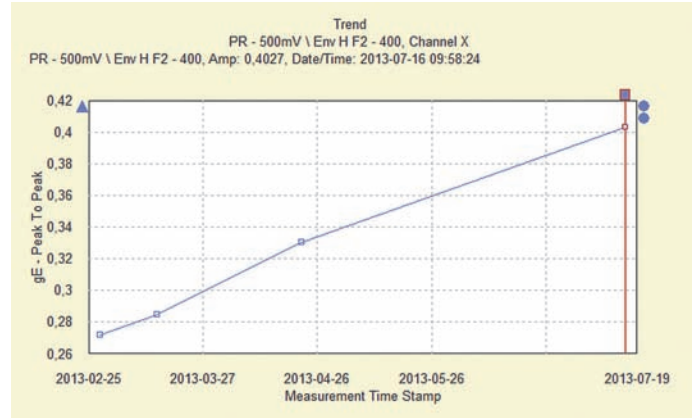
Tabela 6

Porównanie amplitudy częstotliwości charakterystycznych łożyska rejestrowanych przez dwa akcelerometry, pomiar lutu 2013 r., kierunek H

Element łożyska	Obwiednia przyspieszenia [gE]	
	Akcelerometr	
	100 mV/g	500 mV/g
BPFO Bieżnia zewnętrzna	0,001715	0,005661
BPFI Bieżnia wewnętrzna	0,007495	0,034560
BSF Elementy toczne	0,005090	0,010390

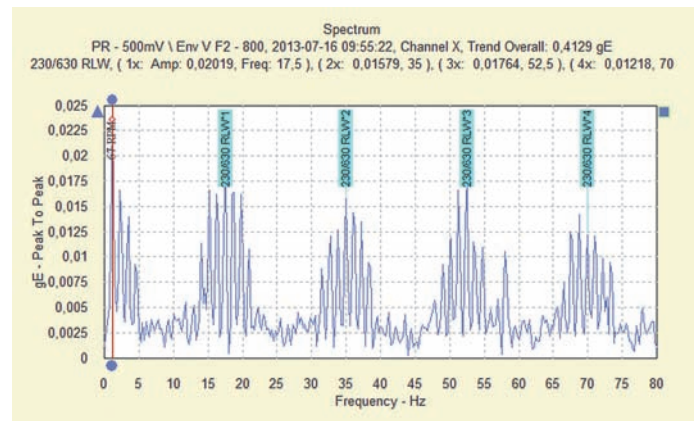


Rys. 3. Wykres trendu zmian prędkości drgań (zgodnie z PN-ISO 10816)

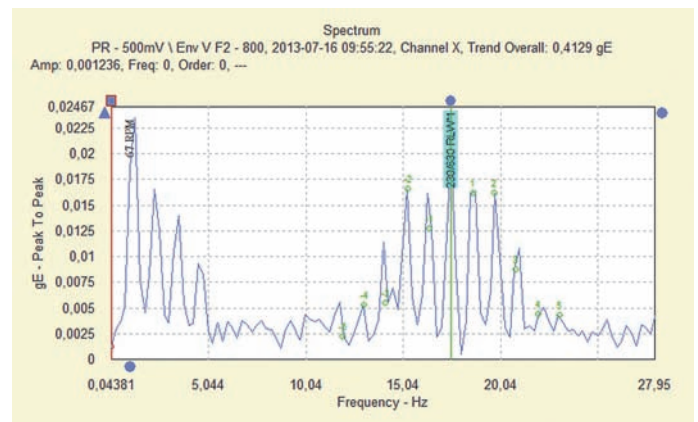


Rys. 4. Wykres trendu zmian obwiedni przyspieszenia (gE)

Przeprowadzono analizę widma FFT obwiedni przyspieszenia (rys. 5, 6) w celu zidentyfikowania źródła problemów w łożysku. Ustalono pobudzenie częstotliwości charakterystycznej BPFI pierścienia wewnętrznego.



Rys. 5. Widmo obwiedni przyspieszenia, pobudzona częstotliwość pierścienia wewnętrznego łożyska BPFI

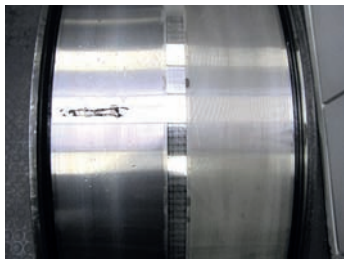


Rys. 6. Widmo obwiedni przyspieszenia, powiększony wycinek wykresu z rysunku 5. Widoczna pobudzona częstotliwość pierścienia wewnętrznego łożyska (BPFI) oraz wstęgi boczne przesunięte od częstotliwości BPFI o częstotliwość obrotową

Z uwagi na proporcje amplitud częstotliwości głównych do amplitud wstęp bocznych potwierdzono możliwość dalszej, ale ostrożnej eksploatacji maszyny do czasu aż amplituda wstęp bocznych nie zacznie przewyższać amplitudy częstotliwości BPFi a trend zmiany obwiedni przyspieszenia nie wykaże zmian logarytmicznych. W ten sposób uzyskany został cenny czas na sprowadzenie nowych łożysk.

W lipcu 2013 r. nastąpiła zaplanowana wymiana łożysk, egzemplarz zdemontowano, rozebrano na części i poddano inspekcji. W jej wyniku potwierdzono uszkodzenie, które miało charakter głębokiego złuszczenia fragmentu bieżni wewnętrznej łożyska (rys. 7, 8).

Wyniki pomiarów potwierdzają potrzebę zachowania ostrożności w doborze metod analizy. Uzyskane wartości amplitud uszkodzonego łożyska są na bardzo niskim poziomie, co wymaga właściwej konfiguracji urządzenia pomiarowego. Zależności matematyczne pomiędzy geometrią elementów wirujących maszyny i prędkością obrotową, a parametrami technicznymi akcelerometrów utrudniają obserwację wszystkich częstotliwości.



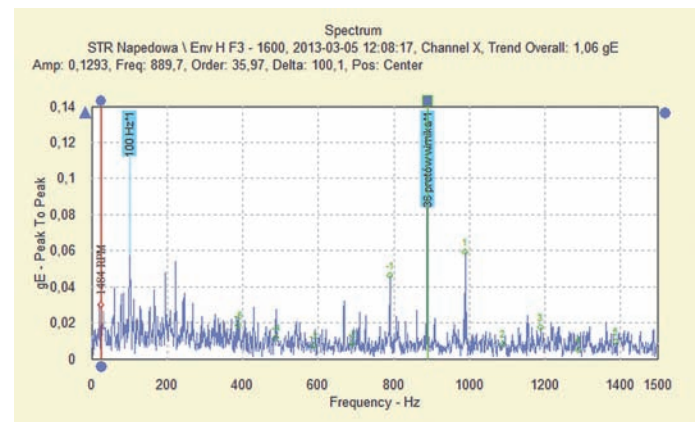
Rys. 7. Fotografia bieżni wewnętrznej łożyska z widocznym uszkodzeniem



Rys. 8. Widoczne głębokie złuszczenie bieżni oraz ślady zawalcowania wyrwanych fragmentów bieżni

Interesującym uzupełnieniem jest spojrzenie, jak metody dedykowane do analizy drgań elementów metalowych maszyn np. łożysk nadają się do obserwacji problemów w silnikach elektrycznych. Typowym obserwowanym problemem są uszkodzenia uzwojeń stojana w strefie żłobków rdzenia oraz uszkodzenia uzwojenia klatkowego wirnika związane z pękaniem prętów klatki wirnika. Obydwa problemy podczas analizy widmowej pobudzają częstotliwość odpowiadającą dwukrotnej wartości częstotliwości sieci zasilającej, a więc 100 Hz oraz częstotliwość wynikającą z pomnożenia prędkości obrotowej (Hz) przez liczbę prętów lub żłobków. Przykładem są badania silnika o mocy 1000 kW i prędkości obrotowej 1484 obr/min, w którym podczas rutynowej kontroli stanu łożysk stwierdzono (rys. 9) pobudzenie częstotliwości 100 Hz (2FL) odpowiadającej dwukrotnej wartości częstotliwości sieci zasilającej oraz pobudzenie częstotliwości 889 Hz odpowiadającej liczbie 36 prętów klatki wirnika.

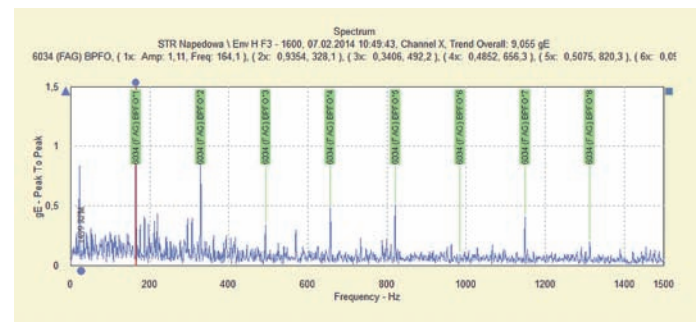
Dodatkowo widoczne są wstęgi boczne od częstotliwości 889 Hz przesunięte o dokładnie 100 Hz, co jednoznacznie potwierdza źródło problemów.



Rys. 9. Widmo obwiedni przyspieszenia silnika (1000 V, 50 Hz, 200 kW)



Rys. 10. Przykładowe uszkodzenie prętów klatki wirnika silnika 800 kW



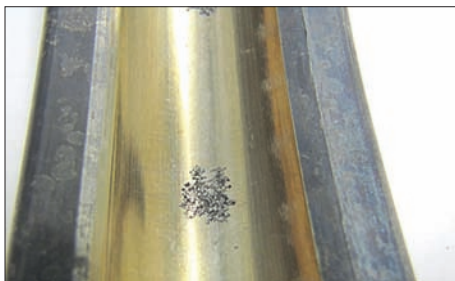
Rys. 11. Widmo obwiedni przyspieszenia silnika (1000 V, 50 Hz, 300 kW)

Dodatkowym obserwowanym problemem jest przepływ prądu przez łożyska, który może spowodować uszkodzenie powierzchni styku elementów tocznych i bieżni w łożysku (erozję elektryczną) oraz przyspieszoną degradację smaru. W silnikach elektrycznych i generatorach występuje dodatkowo niebezpieczeństwo ze strony prądów o wysokiej częstotliwości ze względu na naturalną reaktancję pojemnościową występującą w silniku i wywołującą powstawanie prądów błędzących. Ryzyko uszkodzenia znacznie się zwiększa jeśli silnik jest sterowany przez przemiennik częstotliwości. Przykład takiego uszkodzenia odnotowano podczas badania silnika indukcyjnego 3-fazowego z wirnikiem jednoklatkowym o mocy

300 kW. Stwierdzono pobudzenie częstotliwości 164,1 Hz (BPFO, rys. 11) odpowiadającej częstotliwości pierścienia zewnętrznego łożyska strony napędowej silnika.

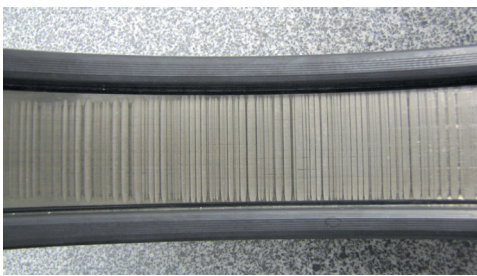
Podczas czynności remontowych silnika węzeł łożyskowy poddano szczegółowej analizie, w wyniku której stwierdzono wewnątrz łożyska uszkodzenia charakterystyczne dla przepływu prądu elektrycznego (rys. 12). Tworzący się łuk elektryczny pomiędzy elementami tocznymi a pierścieniami łożyska powoduje w takich wypadkach – zależnie od kształtu elementów – powstawanie uszkodzeń, które w perspektywie czasu prowadzą do wzrostu poziomu drgań i ciepła, a w rezultacie przedwczesnych uszkodzeń.

Innym przykładem działania niekorzystnych zjawisk związanych z przepływem prądu jest przypadek kiedy przepływ prądu przez łożysko następuje podczas pracy silnika (rys. 13).



Rys. 12. Zdemontowane łożysko 6034 silnika.

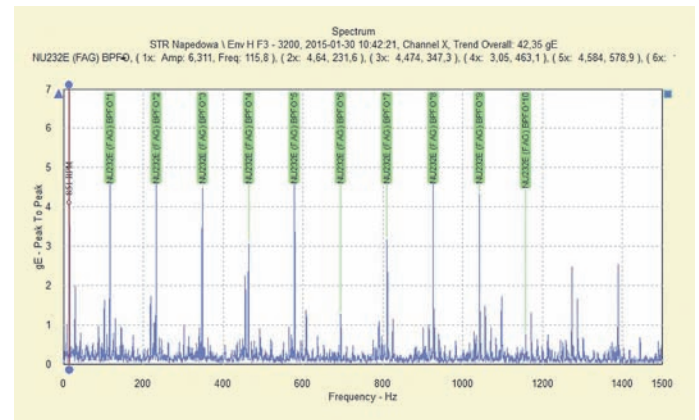
Widoczne kraterki na bieżni łożyska powstałe na skutek przepływu prądu przez łożysko podczas prac remontowych przeprowadzonych na unieruchomionym silniku



Rys. 13. Pierścień zewnętrzny łożyska walcowego NU 232

W badanym silniku w bardzo krótkim czasie nastąpił duży przyrost prędkości drgań i obwiedni przyspieszenia. Podczas badania wibrodiagnostycznego na wykresie widma obwiedni przyspieszenia wyraźnie widać było pobudzenie częstotliwości świadczących o uszkodzeniu pierścienia wewnętrznego łożyska (rys.14). W trakcie oględzin przeprowadzonych po awarii stwierdzono na bieżni łożyska szereg charakterystycznych śladów, których kształt i rozmiar odpowiada stykowi cylindrycznych elementów tocznych łożyska z bieżnią. W celu zapobiegania dalszym podobnym awariom w przedmiotowym silniku, problem rozwiązano poprzez zastosowanie na wzór fabrycznych rozwiązań

z innych typów silników specjalnego łożyska, którego pierścień zewnętrzny w miejscu styku z korpusem silnika jest pokryty warstwą tlenku glinu pełniącego warstwę izolacyjną.



Rys. 14. Widmo obwiedni przyspieszenia silnika (690 V, 50 Hz, 1500 kW)

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań i doświadczeń można stwierdzić, że do zagadnienia diagnostyki maszyn wolnoobrotowych potrzebne jest całkiem odmienne podejście niż do diagnostyki pozostałych typów maszyn. Bardzo ważny jest odpowiedni dobór wszystkich czynników mających bezpośredni wpływ na poprawność przeprowadzanych badań:

- dobranie czujników pomiarowych o odpowiedniej dużej czułości,
- ustalenie odpowiedniego szerokiego zakresu badanych częstotliwości,
- dopasowanie czasu trwania pomiarów do charakteru pracy maszyny (w przypadku maszyn, w których okres ustabilizowanej pracy jest krótki).

Warto zapamiętać fakt, iż za pomocą badań wibrodiagnostycznych można nie tylko zdiagnozować usterki mechaniczne występujące w urządzeniach, ale także rozwiązać problemy natury elektrycznej.

LITERATURA

- [1] PN-ISO 10816-1:1998 Drgania mechaniczne. Ocena drgań maszyny na podstawie pomiarów na częściach niewirujących.
- [2] Drak B.: Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 89/2011.
- [3] Barratt M.: Low Speed Bearing Monitoring. SKF Reliability Systems MBO1001, 2002.
- [4] Mais J.: Vibration Monitoring and Current of AC Motors. SKF Reliability Systems JMO2011, 2003.
- [5] Łączkowski R.: Wibroakustyka maszyn i urządzeń, WNT, Warszawa 1983.