

Diagnostyka online silników elektrycznych z zastosowaniem pomiaru drgań względnych

Marek Klimowski

1. Wprowadzenie

Obecnie zakłady przemysłowe często wykorzystują w swoich procesach produkcyjnych napędy elektryczne, których koszt zakupu czy naprawy jest bardzo duży. Służbom utrzymania ruchu stawia się wymagania związane z osiąganiem wysokiej efektywności i niezawodności użytkowanych układów napędowych, a tym samym ze zmniejszeniem kosztów eksploatacyjnych. Takie podejście determinuje opracowanie i wdrożenie metod umożliwiających zbieranie oraz analizowanie danych o właściwościach funkcjonujących maszyn. W praktyce oceny stanu dynamicznego maszyn i urządzeń dokonuje się na podstawie wyników pomiarów okresowych lub na podstawie analizy wyników pomiarowych rejestrowanych przez systemy ciągłego nadzoru – monitorowanie online. Przykład badanej na bieżąco maszyny, łożyskowej ślizgowo, przedstawiono na rys. 1. Do diagnostyki zespołów maszynowych najbardziej przydatne są wielkości fizyczne takie, jak: drgania, prąd, temperatura, wyładowania niepełne i sygnał akustyczny [12]. Najbardziej korzystnym rodzajem nadzoru i kontroli stanu dynamicznego maszyn jest zastosowanie w diagnostyce maszyn pomiarów oraz analizy szerokopasmowych poziomów drgań, co daje możliwość bieżącej oceny zarówno ogólnego stanu technicznego monitorowanych obiektów, jak również ich poszczególnych podzespołów. Niemal wszystkie defekty maszyn wirnikowych znajdują swoje odzwierciedlenie w drganiach. Wynika to z bezpośredniego związku sygnału drganiowego z charakterystycznymi dla tych maszyn częstotliwościami drgań wirników, łożysk, kół zębatych itp. Prowadząc pomiar sygnałów wibroakustycznych, otrzymujemy ważne informacje o takich problemach stanu dynamicznego maszyny, jak:

- wysoki poziom drgań synchronicznych (związanych z obrotami maszyny);
- ugięcie wału;
- pęknięcie wału;
- złe osiowanie wału;
- drgania od niestabilności filmu olejowego;
- przytarcia wirnika;
- niewyważenie wirnika;
- obłuzowane części;
- uszkodzenie łożysk;
- uszkodzenie zębów przekładni zębatych;
- rozosiewanie sprzęgieł;
- występowanie obciążeń promieniowych (wewnętrznych i zewnętrznych, w tym nieosiowości) [15].

2. Pomiary drgań maszyn elektrycznych

W kontroli napędów krytycznych wykorzystuje się zarówno pomiary drgań bezwzględnych, jak i względnych. Parametrami pomiarowymi drgań mogą być następujące wielkości:

Streszczenie: Artykuł prezentuje możliwości prowadzenia diagnostyki eksploatacyjnej online silników elektrycznych przy wykorzystaniu pomiaru i analizy drgań względnych wałów wirujących. Zawarto w nim metodologię pomiaru, schemat układu pomiarowego, rodzaje stosowanych czujników i przetworników sygnału drganiowego. Opisano zasady, którymi należy kierować się przy doborze miejsca instalacji aparatury pomiarowej oraz sposobu jej montażu. Wskazano możliwe źródła zakłóceń, mogących prowadzić do wystąpienia istotnych błędów realizowanego pomiaru sygnału drganiowego. Za przykład posłużył napęd łożyskowej ślizgowo, pracujący w jednej z polskich cementowni. W pracy zaprezentowano możliwości diagnostyczne w ruchu ciągłym maszyn elektrycznych, po dokonaniu analizy trajektorii ruchu środka czopa wału wirnika, rozkładu pomiarów drgań względnych w funkcji trendu oraz widma występujących drgań względnych.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, drgania względne, badania diagnostyczne online, łożyska ślizgowe.

ON-LINE DIAGNOSTIC TESTING OF ELECTRICAL MOTORS WITH THE USE OF MEASUREMENTS OF RELATIVE VIBRATIONS

Abstract: The possibilities for the on-line operational diagnostic testing of electrical motors with the use of measurement and analysis of relative vibrations of rotating shafts have been presented in the article. In the article the following have been included: the methodology of measurement, the outline of the measurement system, types of the applied sensors and vibration signal transducers. The rules have been described which should be followed while selecting the spot where the measurement equipment is to be installed as well as the assembly method. Possible sources of interferences, which can cause serious failures of the performed measurement of the vibration signal, have been indicated. An engine made on sliding bearings and applied in one of Polish cement plants served as an example. The diagnostic possibilities in a continuous operation of electric machines have been presented in the study after performing the analysis of the trajectory of the rotor shaft motion, distribution of measurements of relative vibrations in the trend function and the spectrum of the occurring relative vibrations.

Keywords: electric machines, relative vibrations, online diagnostic testing, sliding bearings.

- przemieszczenie drgań, mierzone w mikrometrach;
- prędkość drgań, mierzona w milimetrach na sekundę;
- przyspieszenie drgań, mierzone w metrach na sekundę do kwadratu.



Rys. 1. Napęd, na którym realizowana jest eksploatacyjna diagnostyka online drgań, tj. silnik indukcyjny 3-fazowy, pierścieniowy typu DOLMEL SYUe-148r/01 o mocy $P_N = 1000$ kW, $n = 738$ obr/min

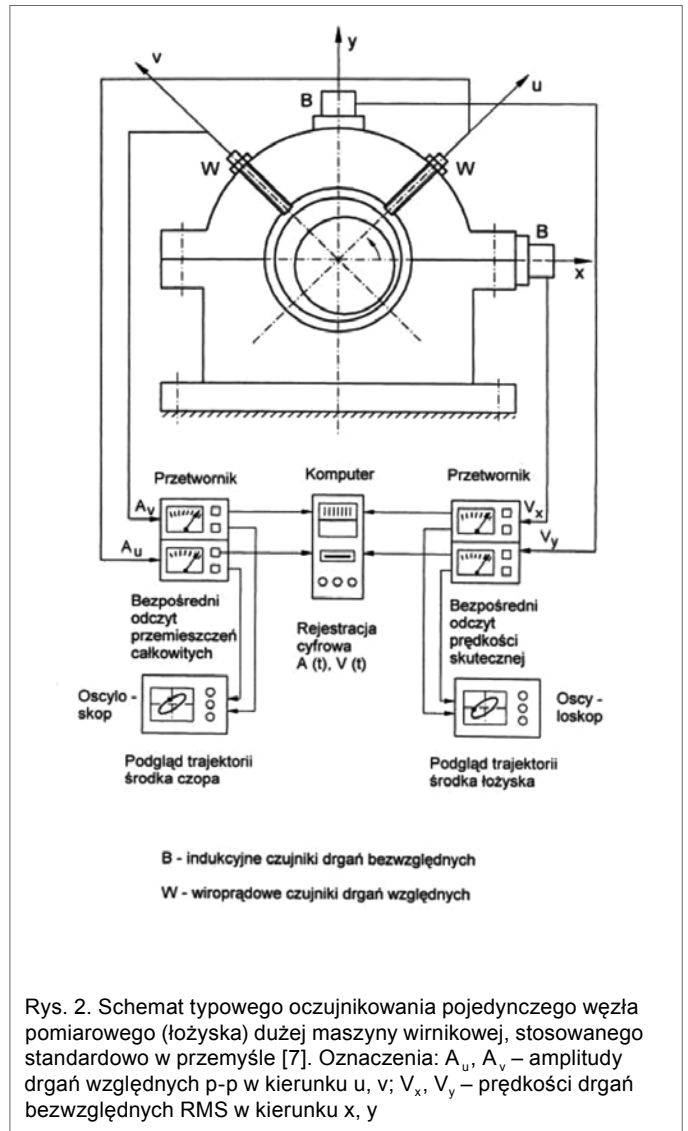
Często przyjmuje się przedział częstotliwości od 10 Hz do 1000 Hz. Jednakże różnym typom maszyn mogą odpowiadać różne zakresy częstotliwości i różne wielkości pomiarowe. Badania stanu technicznego maszyn elektrycznych realizuje się poprzez pomiary: drgań bezwzględnych obudów łożysk, drgań względnych wałów, drgań kadłubów maszyn, drgań fundamentów, drgań rurociągów. Biorąc pod uwagę zakres wykonywanych badań, możemy je podzielić na:

- pomiar ogólnego poziomu drgań w określonym, szerokim paśmie częstotliwości, przy użyciu mało skomplikowanych przyrządów pomiarowych;
- diagnostykę opartą na analizie kąta fazowego i innych symptomów drgań przy użyciu bardziej skomplikowanej, przenośnej aparatury pomiarowej;
- diagnostykę opartą o analizę komputerową drgań i systemy ciągłego monitorowania [4].

Pomiarów drgań bezwzględnych dokonuje się na częściach niewirujących maszyny, tj. stojakach łożysk ślizgowych oraz w wyznaczonych miejscach korpusu. Są one często stosowane ze względu na łatwość przeprowadzania oraz stosunkowo niski koszt. Pomiary drgań względnych wykonywane są na wirujących elementach maszyn, np. wałów. Należą do bardziej skomplikowanych i droższych, wymagają bowiem odpowiedniego oprzyrządowania pomiarowego montowanego na stałe, zwykle w obudowie łożyska. Na rysunku 2 przedstawiono schemat typowego węzła pomiarowego dużej maszyny wirnikowej, jakim jest łożysko wraz ze stojakiem łożyskowym. Zobrazowano na nim rozmieszczenie czujników do pomiaru drgań bezwzględnych korpusu łożyska i czujników do pomiaru drgań względnych czopa względem panwi łożyskowej oraz przebieg sygnałów pomiarowych, sposób ich przetwarzania i wykorzystania.

2.1. Metodyka pomiaru drgań względnych

Pomiary drgań względnych i ich analiza pozwalają na bardzo wczesne zauważenie rozwijającej się nieprawidłowości pracy silnika związanej z wirnikiem i łożyskami [10]. Przedmiotem pomiarów są względne przemieszczenia drgań, zwykle czopów

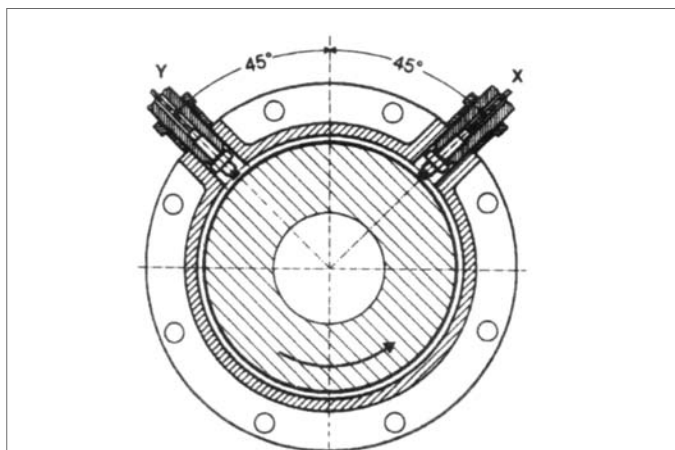


Rys. 2. Schemat typowego oczujnikowania pojedynczego węzła pomiarowego (łożyska) dużej maszyny wirnikowej, stosowanego standardowo w przemyśle [7]. Oznaczenia: A_u , A_v – amplitudy drgań względnych p-p w kierunku u, v; V_x , V_y – prędkości drgań bezwzględnych RMS w kierunku x, y

łożyskowych względem panwi. Badania realizowane są głównie za pomocą dwóch bezdotykowych czujników wiroprowadowych, zamontowanych na każdym łożysku maszyny lub w bezpośrednim ich sąsiedztwie na specjalnych stelażach, w położeniach umożliwiających ocenę poprzecznego lub wzdłużnego ruchu wału czy wirnika. Pomiar ten ukazuje przemieszczenie czopa wału względem panewki łożyska oraz pozwala na określenie trajektorii środka czopa wału. W ten sposób możemy określić stan obciążenia maszyny oraz stopień zużycia panewki. Przetworniki powinny być zainstalowane promieniowo w tej samej płaszczyźnie prostopadłej do osi wału lub w płaszczyznach możliwie bliskich siebie. Pomiędzy czujnikami jest rozstaw kątowny $90^\circ \pm 5^\circ$ [11], a osie czujników z płaszczyzną poziomą tworzą kąt 45° , rys. 3. Możliwe lokalizacje instalacji przetworników do pomiaru drgań względnych przedstawiono na rys. 4.

2.2. Czujniki do pomiaru drgań względnych

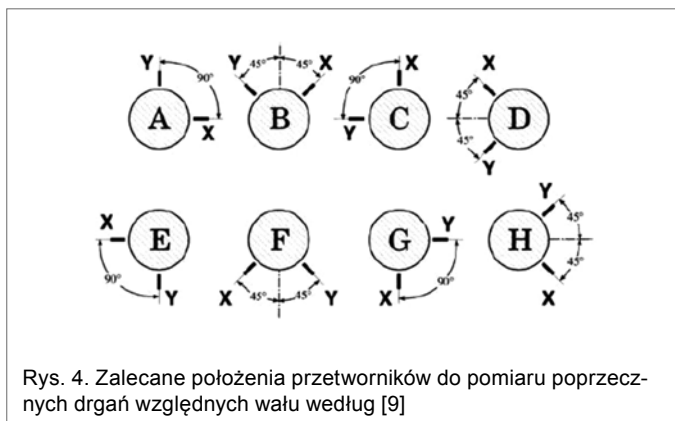
Drgania względne mierzone są w ruchomym układzie odniesienia zbudowanym z czujników drgań przymocowanych na sztywno do drgającej obudowy łożyska, obserwujących powierzchnię wirnika. W badanym silniku zamontowano wza-



Rys. 3. Przykład montażu czujników drgań względnych wału w kierunku poprzecznym [4]



Rys. 5. Bezdotykowy układ pomiarowy MDS10/MDT10 [15]



Rys. 4. Zalecane położenia przetworników do pomiaru poprzecznych drgań względnych wału według [9]

jemnie prostopadłe dwa czujniki wiropędowe MDS10 oraz dwa przetworniki MDT10 firmy Technicad. Bezdotykowy układ pomiarowy czujnik MDS10 – przetwornik MDT10 jest urządzeniem przetwarzającym wielkość szczeliny na napięcie wyjściowe, mierzącym odległość pomiędzy końcówką główki czujnika a obserwowanym celem zarówno w trybie statycznym, jak i dynamicznym. Ogólne zastosowanie układu to dokładny, bezdotykowy pomiar odległości. Jednak jego najczęstsze zastosowanie to pomiary położenia wału oraz drgań względnych na maszynach wirujących. Układ może być zamontowany na takich maszynach, jak turbiny wodne i parowe, sprężarki, pompy, silniki elektryczne i generatory, tam gdzie zastosowano łożyska ślizgowe z filmem olejowym. Układ czujnik – przetwornik pozwala na zobrazowanie dynamicznego ruchu wału względem łożyska. Na rysunku 5 przedstawiono fotografię, a poniżej najważniejsze dane techniczne przykładowego układu pomiarowego czujnika zbliżeniowego.

Dane techniczne:

- Metrologiczne:
 - zakres pomiarowy: 2; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0 mm;
 - zakres napięcia wyjściowego: -4 V do -20 V;
 - czułość: -8,00; -6,40; -5,33; -4,57; -4,0 V/mm;
 - pasmo przenoszenia: 0-10 KHz;

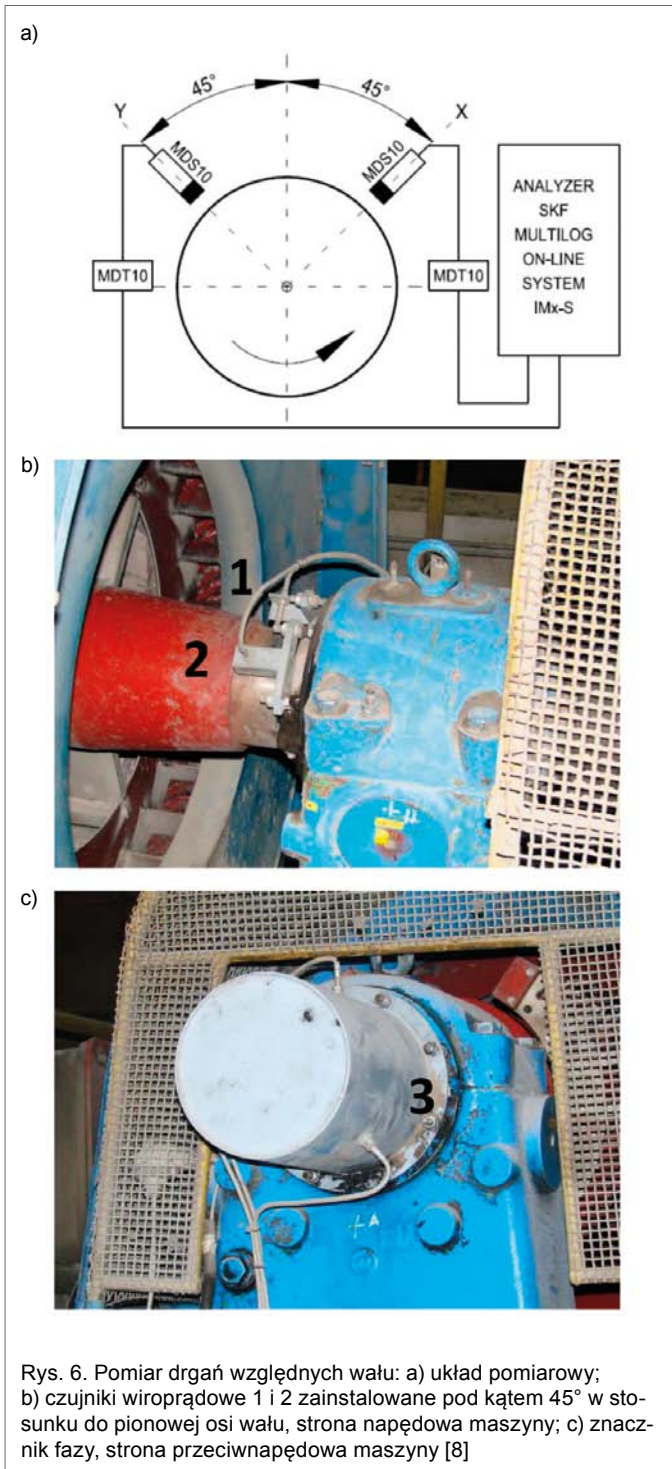
- maksymalny błąd pomiarowy odniesiony do zakresu przy +22°C: ±1%;
- maksymalny błąd pomiarowy odniesiony do zakresu z uwzględnieniem błędów wzajemnej zamienialności (czujnika, kabla przedłużającego, przetwornika) oraz w zakresie temperatury otoczenia od 0°C do +50°C: ±5%;
- maksymalny błąd dodatkowy od temperatury otoczenia (w całym deklarowanym zakresie jej zmian) odniesiony do zakresu: czujnik: ±3%; przetwornik: ±1%.

- Elektryczne:
 - zasilanie: -24 V ± 1,5 V;
 - pobór prądu: < 15 mA;
 - obciążenie wyjścia minimum: 10 KW.
- Środowiskowe:
 - temperatura otoczenia:
 - czujnik: -35°C do +180°C,
 - przetwornik: -35°C do +70°C;
 - wilgotność względna:
 - czujnik: do 95%, bez kondensacji,
 - przetwornik: do 95%, bez kondensacji.

2.3. Układ do pomiaru drgań względnych

W badanym napędzie zastosowano układ pomiarowy składający się z dwóch zbliżeniowych czujników wiropędowych, zamontowanych prostopadłe do siebie, które połączono z analizatorem SKF Multilog On-line System IMx-S, rys. 6. Czujnik oznaczony, jako „Y” przyjmuje kierunek V pionowy, a czujnik oznaczony, jako „X” kierunek poziomy. Zgodnie z konwencją oznaczeń pomiaru przetwornik „X” umieszczany jest zawsze na prawo od przetwornika „Y”, patrząc od strony napędu maszyny.

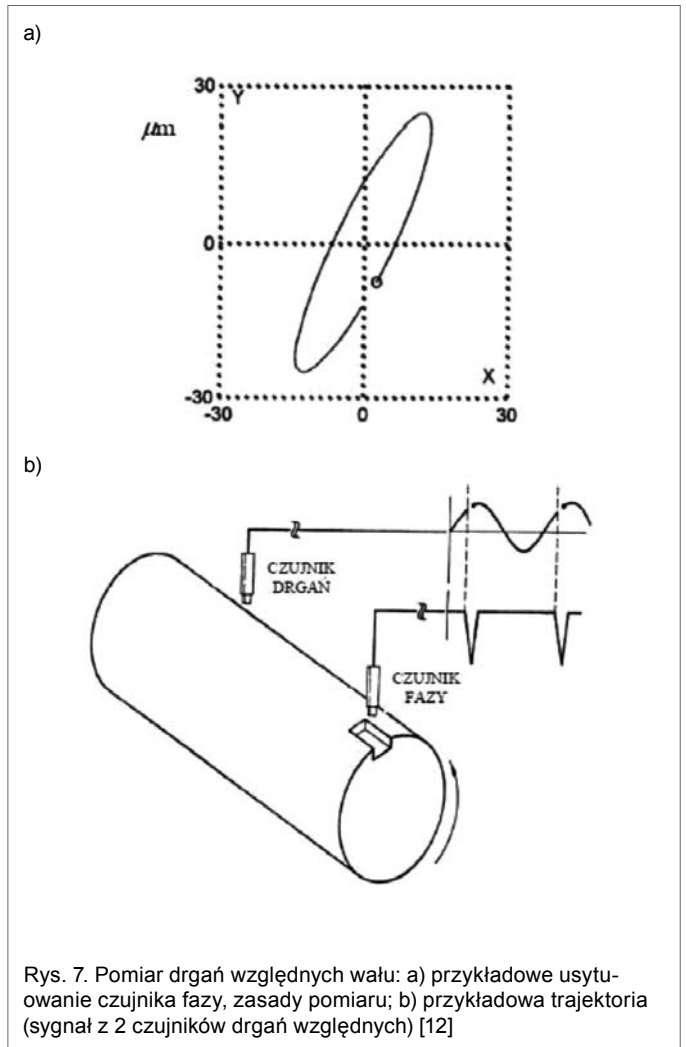
Pojedynczy zestaw pomiarowy, składający się z czujnika MDS10 i przetwornika MDT10, jest urządzeniem przetwarzającym wielkość szczeliny na sygnał napięciowy w danej chwili czasu. Posiada on składową stałą i zmienną. Składowa stała daje informację o położeniu wału względem punktu odniesienia, natomiast składowa zmienna przekazuje dane o drganiach wału w płaszczyźnie promieniowej. Charakterystyka układu XY sygnałów z obu zestawów pomiarowych tworzy trajektorię ruchu środka czopa wału. Otrzymaną trajektorię odnosi się do wyróżnionego położenia kąтового wału wirnika. W tym celu na wale wprowadza się znacznik położenia, np. wgłębienie



Rys. 6. Pomiar drgań względnych wału: a) układ pomiarowy; b) czujniki wiropądowe 1 i 2 zainstalowane pod kątem 45° w stosunku do pionowej osi wału, strona napędowa maszyny; c) znacznik fazy, strona przeciwnapędowa maszyny [8]

na końcówce wału, który jest znacznikiem fazy, tzw. *keyphasor*. W czasie online jest on obserwowany przez czujnik fazy, tzw. *keyphasor transducer* współpracujący z parą czujników bezstykowych. Na wykresie trajektorii położenie znacznika fazy przedstawia się jako okrąg lub kropkę. W celu określenia kierunku wirowania na wykresie nie jest rysowany moment przejścia znacznika fazy przed czujnikiem (rys. 7).

Łącznie czujniki do pomiaru drgań względnych ze znacznikiem fazy tworzą kompletny układ do pomiaru środka czopa wału. Wielkością mierzoną jest przemieszczenie drgań, wyrażone w mikrometrach. Cechami trajektorii są: wielkość trajek-



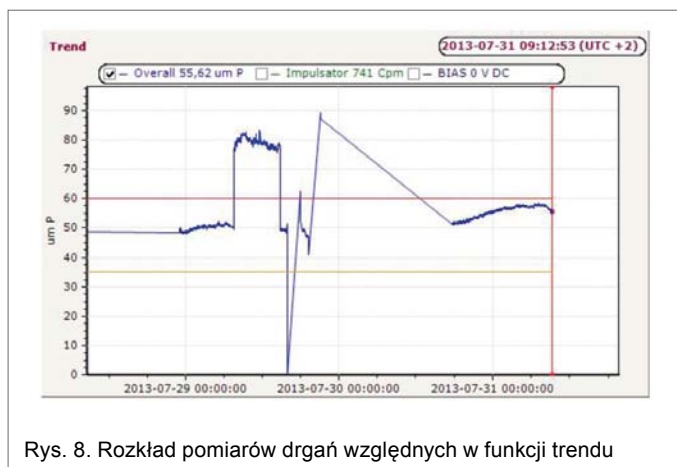
Rys. 7. Pomiar drgań względnych wału: a) przykładowe usytuowanie czujnika fazy, zasady pomiaru; b) przykładowa trajektoria (sygnał z 2 czujników drgań względnych) [12]

torii, zwrot kierunku wirowania punktu na trajektorii, okres, kształt, niezmiennosc cech trajektorii w czasie [13]. Najbardziej oczekiwany przebieg trajektorii przyjmuje kształt zbliżony do okręgu o jak najmniejszej średnicy. Z przebiegu trajektorii otrzymujemy informację pozwalającą na dokonanie oceny stanu technicznego maszyn wirnikowych. Pomiar drgań względnych przy użyciu bezdotykowych czujników zbliżeniowych wiropądowych jest pomiarem uznawanym za najbardziej przydatny w diagnostyce łożysk ślizgowych [14]. Pomimo swoich dużych zalet jest on w krajowym przemyśle rzadko stosowany ze względu na aspekt ekonomiczny związany z wysokimi kosztami zakupu niezbędnej aparatury, oprogramowania oraz trudności przy właściwym przygotowaniu ścieżek pomiarowych na wale.

2.4. Błędy pomiaru drgań względnych

Podczas kontroli ciągłej stanu maszyny realizowanej za pomocą czujników drgań względnych wiropądowych występują błędy pomiaru spowodowane przez:

- niejednorodności geometryczne i materiałowe wirujących elementów (dotyczy przetworników drgań względnych);
- wysoką lub niską temperaturę, jej zmiany;
- pole elektromagnetyczne;
- promieniowanie X i γ ;
- wilgoć;



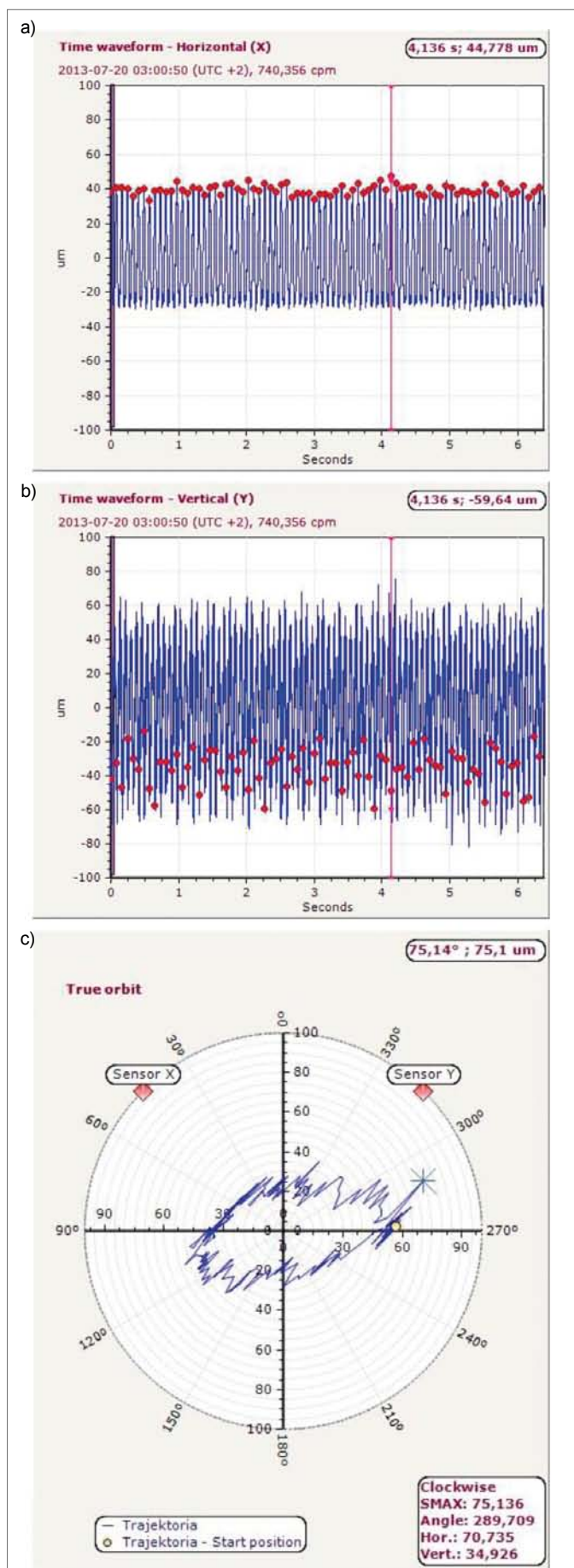
Rys. 8. Rozkład pomiarów drgań względnych w funkcji trendu

- wysoki poziom natężenia dźwięku;
- niedokładności i błędy montażowe;
- drgania poprzeczne względem głównego kierunku pomiaru drgań;
- odkształcenia elementów maszyn w miejscach mocowania przetworników (dotyczy przede wszystkim przetworników drgań bezwzględnych).

Dostępne na rynku przetworniki służące do pomiaru drgań z przeznaczeniem przemysłowym posiadają konstrukcje, które w znaczny sposób ograniczają lub eliminują negatywne oddziaływanie zewnętrznych bodźców. Brak przetworników odpornych na wszystkie wymienione powyżej czynniki powoduje konieczność zwrócenia szczególnej uwagi na dobór odpowiednich miejsc pomiaru drgań oraz prawidłowy montaż zestawów pomiarowych. Przy pomiarze drgań względnych równie ważne jest, by w polu funkcjonowania przetworników elementy ruchome, jak wały czy czopy, posiadały gładką powierzchnię, jednorodną strukturę materiału oraz jednorodne własności magnetyczne. W przeciwnym wypadku mamy do czynienia z zakłóceniami o charakterze magnetycznym, mechanicznym oraz fizykochemicznym, związanymi z powierzchnią wału, które nazywane są runoutem. Zależnie od przyczyny powodującej zakłócenie sygnału rozróżniano jest runout geometryczny, magnetyczny i elektryczny [1, 9]. W celu ograniczenia tego zjawiska niezbędne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni wału do pomiaru drgań względnych przez toczenie, szlifowanie, polerowanie oraz nagniatanie, aż do osiągnięcia odpowiedniego namagnesowania (< 5 Gs) oraz przemieszczeń wartości międzyszczytowych mierzonych przy użyciu czujników wiroprowadzących (< 5 μm) [12]. W pewnych sytuacjach miejscem pomiaru może być powierzchnia platerowana galwanicznie lub metalizowana, przy czym trzeba pamiętać, że może to prowadzić do zmiany charakterystyki przetwornika. Norma PN-ISO 7919-1:2001 zaleca, by zmierzony za pomocą przetwornika wypadkowy runout pochodzenia elektrycznego i mechanicznego nie przekraczał większej spośród dwóch następujących wartości: 25% dopuszczalnego przemieszczenia drganiowego określonego według załącznika A normy lub 6 μm .

3. Diagnostyka online w oparciu o pomiar drgań względnych

W diagnostyce eksploatacyjnej online wykorzystano istniejący napęd krytyczny w jednej z polskich cementowni o mocy



Rys. 9. Wyniki pomiaru dla badanego silnika: a) w kierunku poziomym; b) w kierunku pionowym; c) trajektoria wału

Tabela 1. Charakterystyczne częstotliwości uszkodzeń badanego silnika i zmierzone dla nich wartości przemieszczeń drgań względnych

Częstotliwość [Hz]		Przemieszczenie [μm]	
		Czujnik X (horizontal)	Czujnik Y (vertical)
$1/3f_r$	4,10	0,04	0,02
$1/2f_r$	6,15	0,08	0,03
$2/3f_r$	8,20	0,07	0,04
f_r	12,30	11,82	6,62
$2f_r$	24,60	2,33	1,02

$P_N = 1000$ kW i prędkości obrotowej $n = 738$ obr/min. Przez maszyny krytyczne należy rozumieć te, które nie posiadają dublerów, koszt ich zakupu jest bardzo duży, a ich prawidłowe funkcjonowanie wpływa w sposób zasadniczy na wynik ekonomiczny zakładu przemysłowego [2, 3].

Do wizualizacji wyników pomiaru wykorzystano oprogramowanie @ptitude Observer firmy SKF. Na rysunku 8 przedstawiono możliwość badania zgromadzonych w określonym przedziale czasu pomiarów drgań względnych w funkcji trendu. W analizowanym przedziale zanotowano najniższą wartość przemieszczenia równą $41,2 \mu\text{m}$ oraz najwyższą wartość przemieszczenia równą $88,2 \mu\text{m}$. Z kolei na rys. 9 zaprezentowano

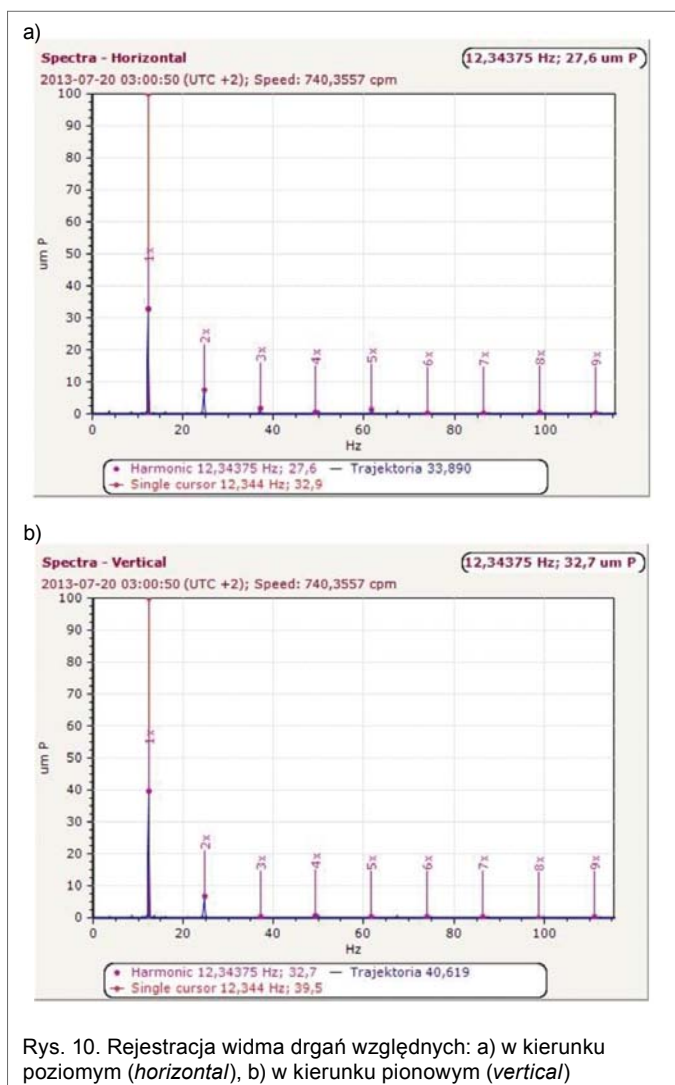
wyniki pomiaru trajektorii środka czopa wału badanego napędu krytycznego w funkcji czasu. System pomiarowy pozwala na rejestrowanie i zobrazowanie poszczególnych składowych sygnału drganiowego, jak również charakterystyki układu XY. Dla składowej poziomej X przy przemieszczeniu $34,926 \mu\text{m}$ i składowej pionowej Y przy przemieszczeniu $70,735 \mu\text{m}$ wartość wypadkowa, punktowa trajektorii w odniesieniu do położenia kąтового wału wirnika $289,709^\circ$ wynosi $75,136 \mu\text{m}$. Dla wskazanego przez użytkownika okresu istnieje możliwość zarejestrowania widma drgań względnych, rys. 10.

W celach analizy sygnału drganiowego wyznaczono za pomocą wzoru 1, częstotliwość odpowiadającą prędkości obrotowej monitorowanego napędu.

$$f_r = \frac{n}{60} = \frac{738}{60} = 12,3 \text{ Hz} \quad (1)$$

gdzie: n – prędkość obrotowa silnika.

Pojawienie się charakterystycznych prążków przy tej częstotliwości, a także jej subharmonicznych $1/3f_r$, $1/2f_r$, $2/3f_r$, $2f_r$, może wskazywać na uszkodzenie łożyska. Z rejestracji widma drgań możemy zaobserwować, że dla częstotliwości $f_r = 12,3$ Hz wystąpiło przemieszczenie $27,6 \mu\text{m}$ w kierunku poziomym i przemieszczenie $32,7 \mu\text{m}$ w kierunku pionowym. Z analizy widma drgań względnych oraz wartości przemieszczeń drgań w kierunku poziomym i pionowym zawartych w tabeli 1 możemy wnioskować, że subharmoniczne $1/3f_r$, $1/2f_r$, $2/3f_r$ nie



Rys. 10. Rejestracja widma drgań względnych: a) w kierunku poziomym (*horizontal*), b) w kierunku pionowym (*vertical*)

występują lub są pomijalnie małe. Pomiar drgań względnych strony napędowej badanego silnika elektrycznego nie wskazuje na pojawienie się uszkodzeń w łożysku, lecz wystąpienie dominującej amplitudy przy częstotliwości f_r może świadczyć o pewnym niewyważeniu wirnika.

4. Ocena stanu łożysk ślizgowych na podstawie pomiarów drgań względnych

Realizując pomiar drgań względnych, dokonujemy oceny stanu technicznego całej maszyny napędowej oraz zabudowanych łożysk ślizgowych. Głównymi przyczynami niesprawności łożysk ślizgowych są: wysoki poziom drgań wynikający z niewyważenia i niewspółosiowości oraz niestabilne warunki pracy łożyska będące pochodną temperatury, obciążenia, luzu, ciśnienia oleju, lepkości oleju, przerw w smarowaniu. Do uszkodzeń łożyska może również dojść w następstwie obecności twardych cząstek w oleju lub przepływu prądu elektrycznego przez łożysko. W praktyce mamy do czynienia ze zużyciem czopów, panewek, pierścieni smarujących i elementów oporowych. Przy małej prędkości obrotowej wału występują drgania o częstotliwości obrotowej f_r , wywołane niewyważeniem lub niewłaściwym wyosiowaniem linii wałów, silnik – maszyna napędzana. Przy wyższych prędkościach obrotowych mogą pojawić się samowzbudne drgania poprzeczne wirnika, których częstotliwość

jest bliska połowie częstotliwości obrotowej wirnika, zwane wirnem olejowym [5]. Kiedy prędkość obrotowa wału osiąga wartości pierwszej prędkości krytycznej, drgania samowzbudne zanikają na skutek znacznego przyrostu drgań o częstotliwości zgodnej z prędkością obrotową. Powyżej prędkości krytycznej drgania o tej częstotliwości zmniejszają się i ponownie mogą pojawić się drgania samowzbudne o częstotliwości bliskiej połowie częstotliwości obrotów wału. Kiedy prędkość obrotowa wału będzie zbliżać się do podwojonej wartości prędkości krytycznej, może wystąpić tzw. bic olejowy [5], czyli składowa drgań o stałej częstotliwości równa w przybliżeniu częstotliwości własnej wirnika. W literaturze samowzbudzone drgania o częstotliwościach subharmonicznych względem obrotów w zakresie $(0,1-1) \times f_r$, rzadziej nadharmoniczna rzędu $1,5 f_r$ nazywane są małymi i dużymi drganiami olejowymi lub wirnem płynowym (*fluid whirl*) i biczem płynowym (*fluid whip*) [10].

5. Podsumowanie

W przypadku napędów krytycznych na łożyskach ślizgowych zaleca się prowadzenie diagnostyki eksploatacyjnej stanu technicznego online, wykorzystującej zarówno pomiary drgań bezwzględnych, jak i względnych. Najlepszą metodą kontroli są okresowe lub ciągłe pomiary szerokopasmowych poziomów drgań przy zakresie częstotliwości od 2 Hz do 10 kHz [4]. Najczęściej występujące defekty maszyn wirujących podpartych na łożyskach ślizgowych to niewyważenie, luz, niesosiowość, przycieranie, rezonans, anomalie pracy łożysk [10, 12]. Mają one destrukcyjny wpływ na dynamikę wirnika i na położenie czopa wału w łożysku. Dla wirujących elementów maszyn: wirników, wałów i tarcz ocenę intensywności drgań prowadzi się zwykle w oparciu o przemieszczenia drgań, niezależnie od prędkości wirowania. Pomimo wyższych kosztów aparatury pomiarowej oraz dodatkowej pracy związanej z montażem układu czujników i przetworników pomiarowych otrzymujemy przy sprawnie działającym systemie pomiaru względnych przemieszczeń wału dużo informacji o: pracy łożysk maszyny, stanie wyważenia wirnika, stanie wygięcia wału, stanie sprzęgieł, przemieszczeniu podpór łożyskowych względem linii kinetostaticznej oraz o innych zjawiskach odzwierciedlających się w położeniu środka czopa, w kole luzów łożyska czy w kształcie trajektorii środka czopa wału [6]. Skutecznym sposobem nadzoru jest ciągła rejestracja drgań względnych. W tym celu instaluje się bezdotykowe czujniki wiropędowe, które w połączeniu ze znacznikiem fazy tworzą układ pomiarowy. Otrzymane z przetworników pomiarowych sygnały niosą informacje, które przy odpowiednim przetworzeniu stanowią doskonałe źródło danych o problemach stanu dynamicznego maszyny, pokazując trend występujących zmian. Pozwala to na wczesne dostrzeżenie symptomów niesprawności oraz alarmowanie o występującym uszkodzeniu. W celu prowadzenia pomiaru obciążonego jak najmniejszym błędem, będącym wynikiem wpływu różnych czynników zewnętrznych, należy pamiętać o prawidłowym doborze miejsca instalacji czujników i przetworników pomiarowych oraz o właściwej ich instalacji. Badania diagnostyczne potwierdzają przydatność w ocenie stanu technicznego napędów przemysłowych na łożyskach ślizgowych, monitoringu online, analizy widma drgań względnych oraz charakterystycznych częstotliwości uszkodzeń. Szybkie wykrycie defektu silnika pozwala uniknąć poważnej awarii, zaplanować naprawę, a tym samym skrócić czas przestoju i zmniejszyć koszt utrzymania

ruchu maszyn oraz urządzeń w zakresie elektrycznym, automatycznym i mechanicznym.

Literatura

- [1] Bently Nevada Corporation: „GLITCH”, *Definition of and Methods for Correction, including Shaft Burnishing to Remove Electrical Runout*. Applications Note. Minden 1990.
- [2] BRÜEL & KJAR: *Machine Condition Monitoring using Vibration Analysis*. Application notes BO 0247-11.
- [3] DWOJAK J.: *Opracowanie efektywnej diagnostyki eksploatacyjnej zespołów maszynowych w energetyce na przykładzie PGE Elektrowni Opole SA*. Komunikat prywatny, 03.2012.
- [4] DWOJAK J., RZEPIELA M.: *Diagnostyka drganiowa stanu maszyn i urządzeń*. Wydanie II. Biuro Gamma, Warszawa 2005.
- [5] GOSIEWSKI Z., MUSZYŃSKA A.: *Dynamika maszyn wirnikowych*. Wyd. WSI w Koszalinie, 1992.
- [6] KICIŃSKI J.: *Dynamika wirników i łożysk ślizgowych*. Wydawnictwo IMP PAN, Gdańsk 2005.
- [7] KICIŃSKI J., RYBCZYŃSKI J., BANASZEK S., ŁUCZAK M., PAŁŻEWICZ A., GRACZYK T., CEGIELSKI A., MARKIEWICZ A., BĄGIŃSKA M.: *Sposoby oceny stanu dynamicznego turbozespołów energetycznych*. Opr. IMP PAN na zlecenie TURBOSERVICE, nr arch. 1013/2001.
- [8] KLIMOWSKI M.: *Wykorzystanie drgań względnych do monitoringu online napędów krytycznych*. Wydawnictwo BOBRME, „Maszyny Elektryczne” 99/2/2013, s. 109–114, Katowice 2013.
- [9] MITCHELL J.S.: *Introduction to Machinery Analysis and Monitoring*, Pennwell Books, Tulsa, Oklahoma 1993.
- [10] MUSZYŃSKA A.: *Misalignment and shaft crack – related phase relationships for 1X and 2X vibration components of rotor responses*. „Orbit” 10/2/1989, pp. 4–8.
- [11] Norma PN-ISO 7919-1:2001 *Drgania mechaniczne maszyn z wyłączeniem maszyn tłokowych – Pomiar drgań wałów wirujących i kryteria oceny – Część 1: Wytyczne ogólne*.
- [12] SZYMANIEC S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie. Zeszyt 333, Opole 2013.
- [13] SZYMANIEC S.: *Pomiary drgań względnych w silnikach elektrycznych*. Wydawnictwo BOBRME Komel, „Maszyny Elektryczne” 82/2009, s. 117–122, Katowice 2009.
- [14] SZYMANIEC S.: *Doświadczenia własne w diagnostyce eksploatacyjnej zespołów napędowych krytycznych w przemyśle*. Wydawnictwo BOBRME Komel, „Maszyny Elektryczne” 3/2012, s. 153–158, Katowice 2012.
- [15] Technicad: *TNC 2010 aparatura do nadzoru maszyn wirnikowych*. Nota Aplikacyjna, Gliwice 2000.

mgr inż. Marek Klimowski – Politechnika Opolska,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki,
Instytut Elektrotechniki Przemysłowej i Diagnostyki.

artykuł recenzowany