

Marek Klimowski
Politechnika Opolska, Opole

WYKORZYSTANIE DRGAŃ WZGLĘDNYCH DO MONITORINGU ON-LINE NAPĘDÓW KRYTYCZNYCH

USING RELATIVE VIBRATIONS FOR THE ON-LINE MONITORING OF CRITICAL MACHINES

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania drgań względnych do monitoringu on-line napędów krytycznych. Za przykład posłużył silnik wykonany na łożyskach ślizgowych, pracujący w przemyśle cementowym. Zawarto w nim opis metody pomiaru, układu pomiarowego, 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. W pracy zaprezentowano możliwości diagnostyczne w ruchu ciągłym, istotnych maszyn elektrycznych, po dokonaniu analizy wibroakustycznej trajektorii ruchu wału wirnika, rozkładu pomiarów drgań względnych w funkcji trendu oraz widma występujących drgań względnych.

Abstract: The possibilities for using relative vibrations for the on-line monitoring of critical machines have been presented in the article. An engine applied in the cement industry and made on sliding bearings served as an example. In the article there have been included the following descriptions: of the measurement technique, the measurement system, the applied sensors and the vibration signal transducers. The rules have been described which should be followed while selecting the spot where the control 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. The diagnostic possibilities in a continuous operation of material electric machines have been presented in the study after performing the vibroacoustic 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.

Słowa kluczowe: *maszyny elektryczne, drgania względne, badania diagnostyczne on-line*
Keywords: *electric machines, relative vibrations, on-line diagnostic testing*

1. Wstęp

Stały rozwój techniki, presja w zakresie minimalizowania kosztów bieżącej eksploatacji posiadanych maszyn elektrycznych wymusza konieczność prowadzenia monitoringu on-line stanu technicznego napędów krytycznych. Przykład badanej maszyny, ułożyskowanej ślizgowo, przedstawiono na rys. 1. Przez maszyny krytyczne należy rozumieć te, które nie posiadają dublerów, ich koszt zakupu jest bardzo duży, a ich prawidłowe funkcjonowanie wpływa w sposób zasadniczy na wynik ekonomiczny zakładu przemysłowego [2, 3]. Najbardziej korzystnym rodzajem nadzoru i kontroli jest zastosowanie w diagnostyce maszyn pomiarów i analizy drgań względnych, jak i bezwzględnych, co daje możliwość bieżącej oceny zarówno ogólnego stanu technicznego monitorowanych obiektów, jak również ich poszczególnych podzespołów. Wynika to z bezpośredniego związku sygnału drganiowego z charakte-

rystycznymi dla tych maszyn częstościami obrotowymi wirników, wału, kół zębatych itp.



Rys. 1. Napęd młyna w jednej z cementowni, tj. silnik indukcyjny 3-fazowy, pierścieniowy typu DOLMEL SYUe-148r/01, o mocy $P_N = 1000kW$, $n = 738$ obr/min

Prowadząc monitoring 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,
- obluzowane części,
- uszkodzenie łożysk,
- uszkodzenie zębów przekładni zębatych,
- rozosiowanie sprzęgieł,
- występowanie obciążeń promieniowych (wewnętrznych i zewnętrznych, w tym nieosiowości) [10].

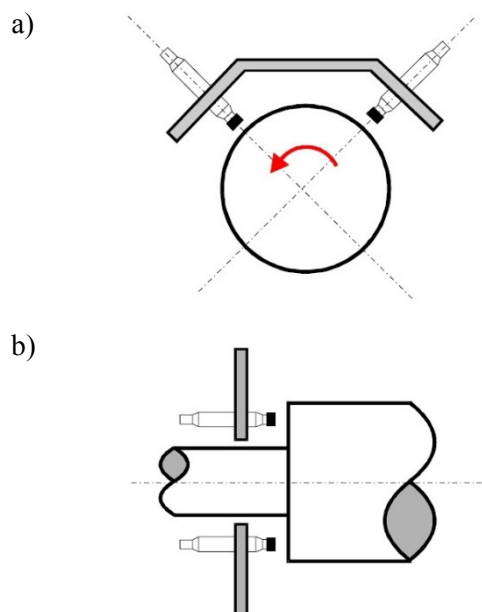
2. Pomiary drgań maszyn elektrycznych

Drgania to zmiana wielkości fizycznej występująca w funkcji czasu i polegająca na tym, że jej wartości są na przemian rosnące i malejące względem pewnego poziomu bądź punktu odniesienia. Wibracje mechaniczne to drgania, rozprzestrzeniające się w ośrodkach stałych, w których zmiana wartości jakiegokolwiek wielkości kinematycznej lub dynamicznej, charakteryzującej stan układu mechanicznego jest funkcją czasu. Wywołują one w elementach maszyn stałe powtarzające się zmienne naprężenia i odkształcenia, które mogą prowadzić do przekroczenia granicy zmęczenia materiału, a w konsekwencji do uszkodzenia drgającego elementu lub zespołu części. Obserwuje się, że występujące drgania napędów krytycznych mogą prowadzić do negatywnych oddziaływań na stan techniczny obiektu, w którym są zamontowane, w szczególności do uszkodzeń fundamentów, pęknięcia ścian i stropów hal produkcyjnych czy maszynowni. Zauważa się także szkodliwe oddziaływanie drgań i towarzyszących im hałasów na system nerwowy człowieka, które obniżają wydajność jego pracy, zwiększają zmęczenie i przy długotrwałym wpływie mogą być przyczyną różnego rodzaju chorób lub urazów. Wysoki poziom drgań maszyny wirującej zależy z jednej strony od siły wymuszającej, a z drugiej od podatności konstrukcyjnej maszyny. Jedną z bardziej sprzyjających okoliczności powstawania wysokich amplitud wibracji i w konsekwencji poważnych uszkodzeń maszyny jest zjawisko re-

zonansu. Rezonans to pokrycie się częstotliwości siły wymuszającej z tzw. częstotliwością własną urządzenia, maszyny czy konstrukcji budowlanej.

2.1. Metodyka pomiaru drgań względnych

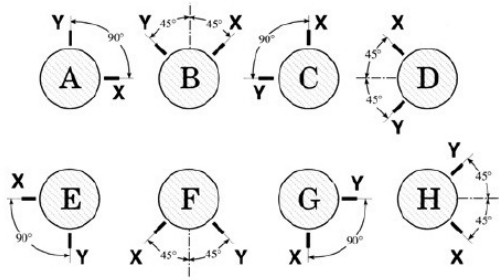
Prowadzone pomiary drgań względnych i ich analiza pozwala na bardzo wczesne zauważenie rozwijającej się nieprawidłowości pracy silnika związanej z wirnikami łożyskami [4]. Proces badawczy realizowany jest przez zastosowanie dwóch bezdotykowych czujników zbliżeniowych wiropędowych, zamontowanych na specjalnych stelażach w położeniach umożliwiających ocenę poprzecznego lub wzdłużnego ruchu wału czy wirnika rys. 2. 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. W przypadku pomiaru drgań względnych wału w kierunku poprze-



Rys. 2. Przykładowe usytuowanie przetworników do pomiaru drgań względnych: a) w kierunku poprzecznym, b) w kierunku wzdłużnym

cznym należy stosować dwa przetworniki zamontowane na każdym łożysku maszyny lub w bezpośrednim ich sąsiedztwie. Przetworniki powinny być zainstalowane promieniowo w tej samej płaszczyźnie prostopadłej do osi wału lub w płaszczyznach możliwie bliskich sobie. Pomiedzy czujnikami jest rozstaw kątowy $90^\circ \pm 5^\circ$ [6], a osie czujników z płaszczyzną poziomą tworzą kąt 45° . Możliwe lokalizacje instalacji

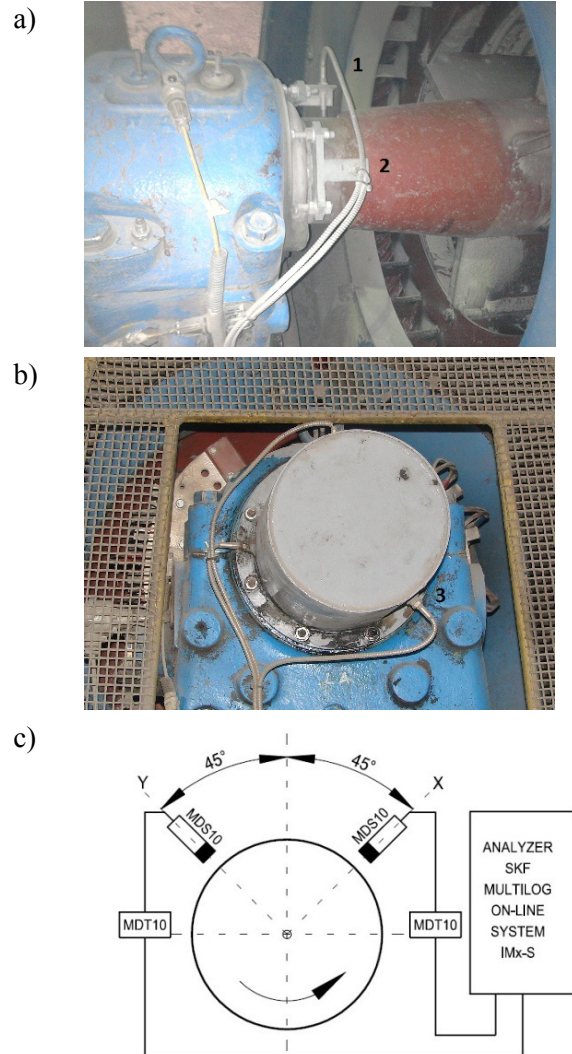
przetworników do pomiaru drgań względnych przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Zalecane położenia przetworników do pomiaru poprzecznych drgań względnych wału według [5]

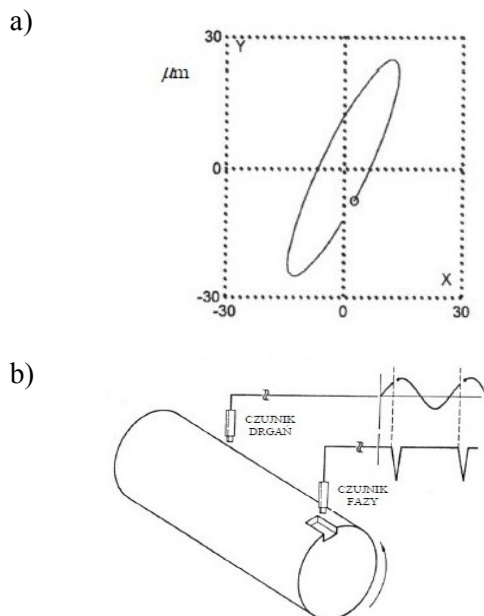
2.2. Układ do pomiaru drgań względnych

W badanym silniku zamontowano wzajemnie prostopadłe dwa czujniki wiropłdowe MDS10 oraz dwa przetworniki MDT10 firmy TechniCad, które połączono z analizatorem SKF Multilog On-line System IMx-S, rys. 4. Czujnik oznaczony jako „Y” przyjmuje kierunek V pionowy, zaś oznaczony jako „X” 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 na końcówce wału, który jest znacznikiem fazy, tzw. keyphasor. W czasie on-line 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 kropka. W celu określenia kierunku wirowania na wykresie nie jest rysowany moment przejścia znacznika fazy przed czujnikiem rys. 5. Łącznie, czujniki do pomiaru drgań względnych ze znacznikiem fazy tworzą kompletny układ do pomiaru środka czopa wału.



Rys. 4. Pomiar drgań względnych wału: a) czujniki wiropłdowe 1 i 2 zainstalowane pod kątem 45° w stosunku do pionowej osi wału, strona napędowa maszyny, b) znacznik fazy, strona przeciwnapędowa maszyny, c) układ pomiarowy.

Wielkością mierzoną jest przemieszczenie drgań, wyrażone w mikrometrach. Cechami trajektorii są: wielkość trajektorii, zwrot kierunku wirowania punktu na trajektorii, okres, kształt, niezmienność cech trajektorii w czasie [8]. 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 wiropłdowych jest pomiarem uznawanym za najbardziej przydatny w diagnostyce łożysk ślizgowych [9].



Rys. 5. Pomiar drgań względnych wału: a) przykładowe usytuowanie czujnika fazy, zasady pomiaru, b) przykładowa trajektoria (sygnał z 2 czujników drgań względnych)[7].

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.

2.3. Zakłócenia podczas realizacji pomiaru sygnału drgań względnych

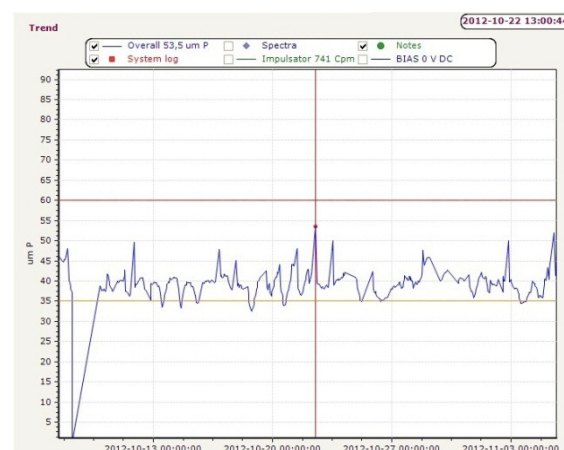
Czujniki i przetworniki stosowane w warunkach przemysłowych są wrażliwe na działanie różnorodnych czynników zewnętrznych, które mogą stać się przyczyną istotnych błędów pomiarowych. Do najpoważniejszych z nich można zaliczyć:

- niejednorodności geometryczne i materiałowe wirujących elementów (dotyczy przetworników drgań względnych),
- wysoką lub niską temperaturę, jej zmiany,
- pole elektromagnetyczne,
- promieniowanie X i γ ,
- wilgoć,
- 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 czynników. 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 rozróżniany jest runout geometryczny, magnetyczny i elektryczny [1, 5]. 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 wiropędowych (<4 μm) [7].

3. Monitoring on-line drgań względnych

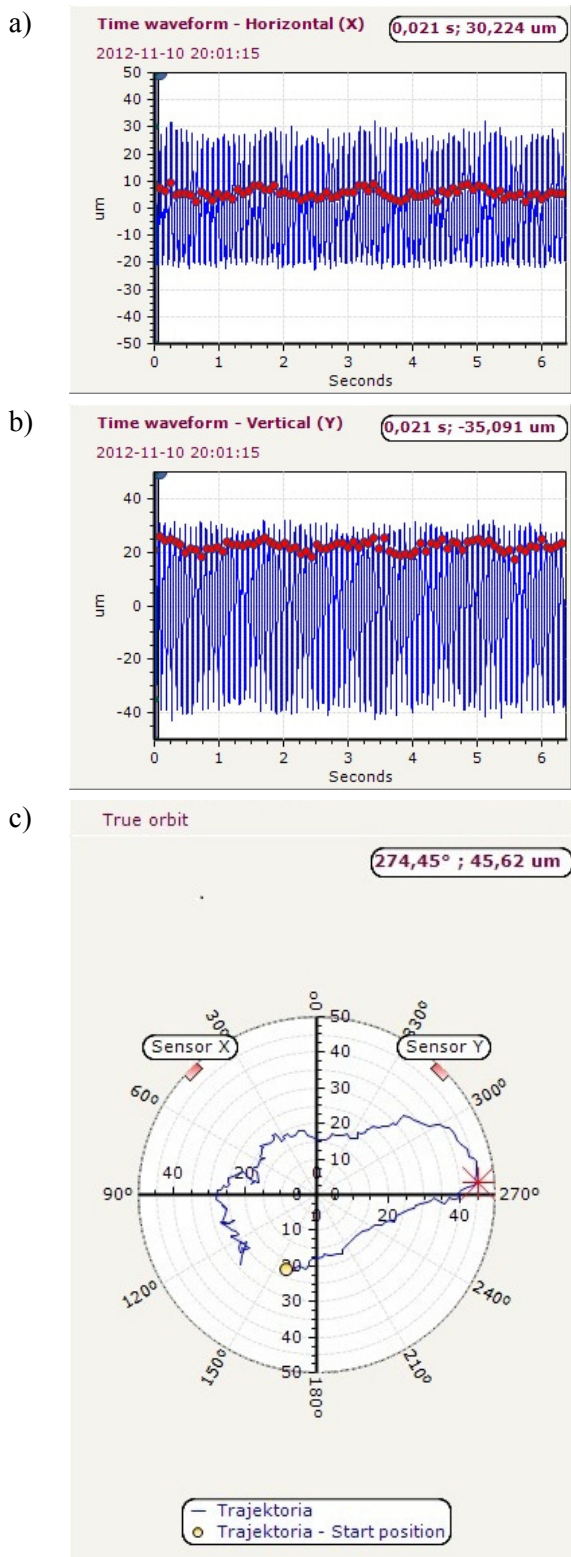
Do badań diagnostycznych wykorzystano istniejący napęd krytyczny w jednej z polskich



Rys. 6. Rozkład pomiarów drgań względnych w funkcji trendu

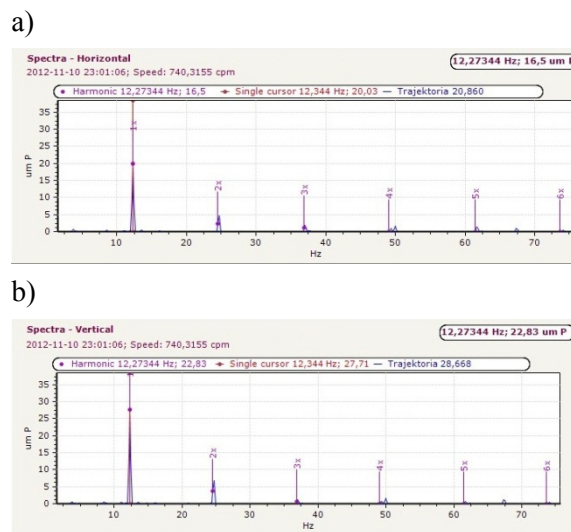
cementowni o mocy $P_N = 1000$ kW i prędkości obrotowej $n = 738$ obr./min. Do wizualizacji

wyników pomiaru wykorzystano oprogramowanie @ptitudeObserver firmy SKF.



Rys. 7. Wyniki pomiaru dla badanego silnika: a) w kierunku poziomym, b) w kierunku pionowym, c) trajektoria wału

Na rys. 6 przedstawiono możliwość analizy zgromadzonych w określonym przedziale czasu pomiarów drgań względnych w funkcji trendu. Zanotowano w analizowanym przedziale najniższą wartość przemieszczenia 32,6 μm 18.10.2012 r. o godz. 18:15:50, a najwyższą wartość przemieszczenia 53,5 μm 22.10.2012 r. o godz. 13:00:44. Z kolei na rys. 7 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 30,224 μm i składowej pionowej Y przy przemieszczeniu 35,091 μm wartość wypadkowa, punktowa trajektorii w odniesieniu do położenia kąowego wału wirnika 274,45° wynosi 45,62 μm . Dla wskazanego przez użytkownika okresu istnieje możliwość zarejestrowania widma drgań względnych, rys. 8.



Rys. 8. Rejestracja widma drgań względnych: a) w kierunku poziomym, b) w kierunku pionowym

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 subharmo-

nicznych $1/3f_r$, $1/2f_r$, $2/3f_r$, $2f_r$, może wskazywać na uszkodzenie łożyska. Z rejestracji widma drgań własnych możemy zaobserwować, że dla częstotliwości $f_r = 12,3 \text{ Hz}$ wystąpiło przemieszczenie $20,03 \text{ }\mu\text{m}$ w kierunku poziomym i przemieszczenie $27,71 \text{ }\mu\text{m}$ w kierunku pionowym. Jak widać na wykresie widmowym częstotliwości drgań względnych łożyska znajdującego się po stronie napędowej silnika nie wskazują na wystąpienie uszkodzeń w łożysku, jednakże występowanie dominującej amplitudy przy częstotliwości f_r może świadczyć o pewnym niewyważeniu wirnika.

4. Uwagi i wnioski końcowe

Maszyny, których właściciel ze względu na aspekt finansowy oraz społeczny będzie traktował jako krytyczne, należy monitorować on-line. Takie podejście do diagnostyki najważniejszych napędów zapewnia indywidualne traktowanie poszczególnych maszyn ze względu na dobór metod pomiarów, w tym sprzętu pomiarowego, oprogramowania, zabezpieczeń. Bardzo dobrym sposobem analizy stanu technicznego nadzorowanych napędów krytycznych jest ciągła rejestracja jego drgań względnych. W tym celu instaluje się bezdotykowe czujniki zbliżeniowe wiroprowadowe, które w połączeniu ze znacznikiem fazy tworzą układ do prowadzonego pomiaru. Otrzymane z przetworników pomiarowych sygnały stanowią dane, które przy odpowiednim przetworzeniu przez wykorzystywany system stanowią doskonałe źródło informacji o problemach stanu dynamicznego maszyny, pokazując trend występujących zmian. Daje to możliwość wczesnego zauważenia symptomów uszkodzenia oraz alarmowania o stanie niesprawności. Należy pamiętać, że wykorzystywana aparatura pomiarowa jest wrażliwa na różnorodne czynniki zewnętrzne, które mogą przyczyniać się do zafałszowania wyników pomiaru. Stąd należy dołożyć wszelkich starań by zadbać o prawidłowy dobór miejsca instalacji czujników i przetworników pomiarowych oraz właściwą ich instalację. Biorąc pod uwagę korzyści płynące z wykorzystania drgań względnych do monitoringu on-line napędów krytycznych, zwłaszcza przy silnikach na łożyskach ślizgowych, zaleca się tą metodę jako bardzo właściwą do pomiaru i analizy sygnałów wibroakustycznych.

5. 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 S.A.*, Komunikat prywatny, 03.2012.
- [4]. Muszyńska 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.
- [5]. Mitchell J.S.: *Introduction to Machinery Analysis and Monitoring*, Pennwell Books, Tulsa, Oklahoma 1993.
- [6]. Norma PN-ISO 7919-1:2001 *Drgania mechaniczne maszyn z wyłączeniem maszyn tłokowych - Pomiar drgań wałów wirujących i kryteria oceny - Część 1: Wytyczne ogólne*.
- [7]. 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.
- [8]. Szymaniec S.: *Pomiary drgań względnych w silnikach elektrycznych*, Wydawnictwo BOBRME, Katowice 2009, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne. Nr 82/2009, str. 117-122.
- [9]. Szymaniec S.: *Doświadczenia własne w diagnostyce eksploatacyjnej zespołów napędowych krytycznych w przemyśle*, Wydawnictwo BOBRME, Katowice 2012, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne. Nr 3/2012, str. 153-158.
- [10]. Technicad: *TNC 2010 aparatura do nadzoru maszyn wirnikowych*. Nota Aplikacyjna, Gliwice 2000.

Autor

mgr inż. Marek Klimowski
Politechnika Opolska. Wydział Elektrotechniki,
Automatyki i Informatyki. Instytut Elektrotechniki
Przemysłowej i Diagnostyki.
45-758 Opole ul. Prószkowska 76, bud. Nr 1.