

KONCEPCJA MONITOROWANIA I DIAGNOSTYKI MASZYN WIRUJĄCYCH MAŁEJ I ŚREDNIEJ MOCY

Tomasz BARSZCZ

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, fax. (012)6343505, tbarszcz@agh.edu.pl

Streszczenie

Artykuł przedstawia propozycję nadzoru diagnostycznego nad maszynami wirującymi małej i średniej mocy, zwanymi tu również maszynami pomocniczymi. Głównym obiektem zainteresowania są maszyny łożyskowe tocznie o mocach od kilkudziesięciu kW do kilku MW. W pierwszej części przedstawiono uwarunkowania pod kątem diagnostyki, odnoszące się do tej grupy obiektów, a następnie określono zadania monitorowania. W kolejnej części zaprezentowano koncepcję diagnozowania obiektów. Została ona oparta na doborze częstotliwości charakterystycznych układu oraz na dopasowaniu poziomów ostrzeżeń do rzeczywistych danych, przechowywanych w bazie. Istotną częścią prezentowanej koncepcji jest automatyzacja procesu konfiguracji. Artykuł zakończono opisem możliwości zastosowań, m. in. w energetyce i transporcie. Dodatkowo zaproponowano możliwości usprawnień eksploatacyjnych.

Słowa kluczowe: maszyny pomocnicze, monitoring, diagnostyka, drgania.

CONCEPT OF MONITORING AND DIAGNOSTICS OF SMALL AND MEDIUM POWER ROTATING MACHINERY

Summary

The paper presents proposal for monitoring and diagnostics of small and medium power rotating machinery, referred to also as auxiliary machinery. Main point of interest are machines with rolling bearings of power between few tens of kW to few MW. The first part presents characteristics of machinery from diagnostics point of view and requirements for monitoring. Next part contains concept of diagnostics for this machines. It is based on selection of characteristic frequencies of the object and tuning of alert levels based on real data, stored in the database. Important part of this concept is automation of this process. The paper ends with proposals of applications, e.g. in power generation and transport. It also contains several ideas, which can improve practical implementation.

Keywords: auxiliary machinery, monitoring, diagnostics, vibration.

1. WPROWADZENIE

Korzyści płynące z zastosowań diagnostyki maszyn są coraz lepiej rozumiane nie tylko przez środowisko naukowe, ale również przez użytkowników maszyn. Do lat 80-tych stosowano jedynie systemy zabezpieczeń. Korzystały one często z sygnałów drgań, ale nadzorowano tylko jeden parametr sygnału, najczęściej wartość skuteczną albo amplitudę międzyszczytową. W ten sposób zabezpieczano tzw. maszyny krytyczne, których awaria może spowodować zagrożenie życia ludzkiego bądź przerwanie procesu produkcyjnego.

W latach 80-tych pojawiły się mikroprocesorowe systemy monitorowania, które wyposażane były w coraz bardziej rozbudowane funkcje diagnostyczne. Z uwagi na bardzo wysoki koszt instalowano je głównie dla najdroższych obiektów, takich jak np. samoloty, turbozespoły energetyczne. Przede wszystkim systemy te umożliwiały

akwizycję przebiegu sygnałów drgań z dużo większą częstotliwością próbkowania, rzędu kilku kiloherców [1]. Niektóre z tych systemów oferowały znacznie rozbudowane funkcje, łącznie ze współpracującymi z nimi systemami ekspertowymi [np. 5].

W następnych latach, głównie na skutek ciągłego spadku cen elektroniki (w tym głównie komputerów) i jednoczesnego poprawiania się ich parametrów technicznych (wydajność procesorów, pojemność pamięci) uzasadnione ekonomicznie stało się stosowanie tych systemów również do maszyn niekrytycznych. Rozszerzanie grup maszyn objętych systemami monitorowania i diagnostyki spowodowało konieczność zmian w podejściu do użytkownika. Systemy stosowane do maszyn krytycznych z reguły są instalowane w zakładach posiadających własne służby diagnostyczne. Systemy przeznaczone do pozostałych maszyn powinny brać pod uwagę łatwość konfigurowania

oraz obsługę przez osoby bez doświadczenia diagnostycznego. Coraz częściej nadzór diagnostyczny jest realizowany przez wyspecjalizowane zespoły (bądź firmy), które świadczą usługi na rzecz wielu przedsiębiorstw. W takim przypadku bardzo istotnym wymaganiem co do systemu diagnostycznego stają się cechy automatycznego powiadamiania o wykrytych niesprawnościach oraz możliwość efektywnego zdalnego dostępu do systemu. W niniejszej pracy przedyskutowano wymagania co do takiego systemu, a także zaproponowano niektóre rozwiązania realizacyjne.

2. CHARAKTERYSTYKA MAŁYCH I ŚREDNICH MASZYN

Maszyny, będące przedmiotem oceny stanu technicznego, typowo klasyfikowane są na cztery grupy, różniące się zakresem stosowanych narzędzi monitorowania i diagnostyki. Poniżej podano charakterystykę poszczególnych grup (np. w [17]).

Tab.1. Charakterystyka grup maszyn

Typ maszyn	Charakterystyka
Krytyczne	Kluczowe dla procesu Bardzo wysokie koszty remontu Możliwe nagłe awarie Koszty awarii są bardzo wysokie (życie i zdrowie, znaczna wartość utraconej produkcji)
Pomocnicze	Istotne dla procesu (w niektórych instalacjach również kluczowe) Średnie koszty remontu Nagłe awarie mało prawdopodobne, z reguły poprzedzone zmianą w działaniu Koszty awarii są wysokie
Ogólnego przeznaczenia	Nie mają bezpośredniego wpływu na proces lub mają wpływ mały Niewielkie koszty remontu Nagłe awarie mało prawdopodobne, z reguły poprzedzone zmianą w działaniu Koszty awarii są średnie lub niskie (często jednak z uwagi na dużą liczbę tego typu maszyn znaczny jest łączny koszt obsługi)
Pozostałe	Niezwiązane z procesem Niskie koszty remontu i ew. wymiany Koszty monitorowania są porównywalne lub wyższe od kosztów remontu/ wymiany

Maszyny pomocnicze (określane tu też jako maszyny małe i średnie) są stosowane bardzo często. Z uwagi na podstawowe różnice pomiędzy nimi a maszynami krytycznymi – z jednej strony – i pozostałymi maszynami – z drugiej strony,

wymagają one innego podejścia do koncepcji monitorowania i diagnostyki.

Szczególnie istotne są różnice pomiędzy maszynami tej klasy a typowymi maszynami krytycznymi, na których instalowane są systemy ciągłego monitorowania, tj. turbozespołami energetycznymi. Charakterystyczne dla tej klasy maszyn jest posiadanie kilku wałów, połączonych przekładniami zębatymi. Wały te mają różne prędkości obrotowe, które mogą mieć bardzo różne wartości od bardzo małych, rzędu kilkunastu rpm (np. wały główne elektrowni wiatrowych) aż do kilkunastu tysięcy rpm (np. szybkoobrotowe turbiny).

Z uwagi na ograniczenia w kosztach instalacji nie dla wszystkich maszyn stosowane są czujniki znacznika fazy, w związku z czym dla niektórych punktów pomiarowych informacja o fazie nie jest dostępna. Z drugiej jednak strony nie jest ona aż tak istotna, jak w przypadku dużych maszyn łożyskowych ślizgowo.

Oprócz zastosowania przekładni inną charakterystyczną cechą jest stosowanie łożysk tocznych. W porównaniu z łożyskami ślizgowymi charakteryzują się one małym wpływem prędkości obrotowej na opory ruchu, mniejszymi oporami podczas rozruchu, większą sztywnością i nośnością oraz niskim kosztem. Z drugiej strony zastosowanie przekładni i łożysk tocznych skutkuje w zupełnie innej charakterystyce częstotliwościowej tak łożyskowych maszyn. Sygnały drgań mają dużo większy zakres częstotliwości. Sygnał drgań ma użyteczne pasmo aż do kilku, a czasami nawet kilkunastu kiloherców. Jako czujniki drgań w ogromnej większości stosowane są akcelerometry, montowane na korpusie.

Inne są też problemy techniczne spotykane w czasie oceny stanu technicznego [np. 10, 16]. Bardzo często są to niesprawności właśnie przekładni i łożysk. Rzadko są to uszkodzenia o charakterze nagłym (choć i takie są spotykane), najczęściej jednak są to rozwijające się stosunkowo powoli uszkodzenia zębów przekładni albo uszkodzenia bieżni, bądź elementów tocznych łożysk. Powstające uszkodzenia powodują rozpraszanie większej ilości energii na procesy resztkowe, którymi są głównie drgania oraz hałas. Procesy te są źródłem dodatkowych składowych w sygnale drgań. Pomiar wartości tych składowych jest wskaźnikiem uszkodzenia elementu maszyny. Częstotliwości składowych zależą od prędkości obrotowej maszyny. Poniżej przedstawiono częstotliwości charakterystyczne najczęściej spotykanych elementów maszyn [4, 12].

Dla przekładni równoległych:

częstotliwość wału,

$$f = f_r \quad (1)$$

częstotliwość zazębiania,

$$f_z = f_{r1}z_1 = f_{r2}z_2 \quad (2)$$

Dla łożysk tocznych:

częstotliwość wału,

$$f = f_r \quad (3)$$

częstotliwość bieżni wewnętrznej,

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (4)$$

częstotliwość bieżni zewnętrznej,

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (5)$$

częstotliwość pojedynczego elementu tocznego,

$$f = \frac{D}{d} f_r \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos^2 \alpha \right) \quad (6)$$

częstotliwość koszyka,

$$f = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right), \quad (7)$$

gdzie:

f_r – prędkość obrotowa wału [Hz],

z – liczba zębów,

α – kąt działania łożyska,

D – średnica podziałowa łożyska,

d – średnica elementu tocznego,

n – liczba elementów tocznych.

Jako częstotliwości charakterystyczne stosuje się również harmoniczne (najczęściej 2. i 3.) niektórych powyżej podanych częstotliwości, szczególnie częstotliwości obrotowe wału i częstotliwości ząbienia. Należy też zauważyć, że w przekładniach, w których rozwijają się uszkodzenia, składowa harmoniczna odpowiadająca częstotliwości ząbienia jest modulowana sygnałami o częstotliwościach równych prędkościom obrotowym wału. Powoduje to powstawanie wstęg bocznych w widmie sygnału drganiowego. Zjawisko to powinno być również monitorowane.

Jak przedstawiono powyżej, częstotliwości charakterystyczne zależą od prędkości obrotowej wału. Maszyny pomocnicze w wielu przypadkach pracują ze zmienną prędkością obrotową. Ma to wpływ na określanie właściwych estymat sygnałów drganiowych, ponieważ w przypadku zmiennej prędkości obrotowej nie są skuteczne metody oparte na widmie wyznaczanym w dziedzinie częstotliwości. Konieczne jest stosowanie analizy w dziedzinie rzędów (ang. order tracking) [15]. Do przeprowadzenia takiej analizy konieczna jest informacja o fazie sygnałów. Uzyskuje się ją poprzez dodanie co najmniej jednego czujnika, tzw. znacznika fazy, który generuje impuls raz na jeden obrót wału. Do niedawna do analizy w dziedzinie rzędów stosowano filtry pasmowe, bądź specjalizowane układy sterowania próbkowaniem

sygnałów drganiowych. Ostatnio proponowane są algorytmy cyfrowego resamplingu sygnałów drgań [np. 2], dzięki którym możliwe jest uproszczenie układów wibrodiagnostyki.

Należy tu dodać, że nawet w przypadku maszyn pracujących ze stałą roboczą prędkością obrotową konieczna jest analiza ich rozbiegów i wybiegów. Aby uniknąć rozmywania prążków widmowych konieczne jest więc stosowanie analizy w dziedzinie rzędów. Z drugiej jednak strony niektóre elementy maszyny generują sygnały drganiowe o stałej częstotliwości (np. rezonanse części nieruchomych). Tak więc system powinien umożliwiać generowanie estymat z widma wyznaczanego w obu dziedzinach.

W przedsiębiorstwach często znajduje się duża liczba maszyn wirujących, a ich nadzorem zajmuje się – jak już wspomniano wcześniej – mała grupa diagnostów, często o niewielkim doświadczeniu diagnostycznym. Wynika stąd potrzeba, aby metody diagnostyczne były jak najprostsze i dawały przejrzyste wyniki. Użytkownik musi rozumieć znaczenie określanych estymat i konsekwencje przekroczenia przez daną estymatę wartości granicznej. Przedstawione powyżej propozycje estymat spełniają powyższe wymagania.

3. ZADANIA MONITOROWANIA

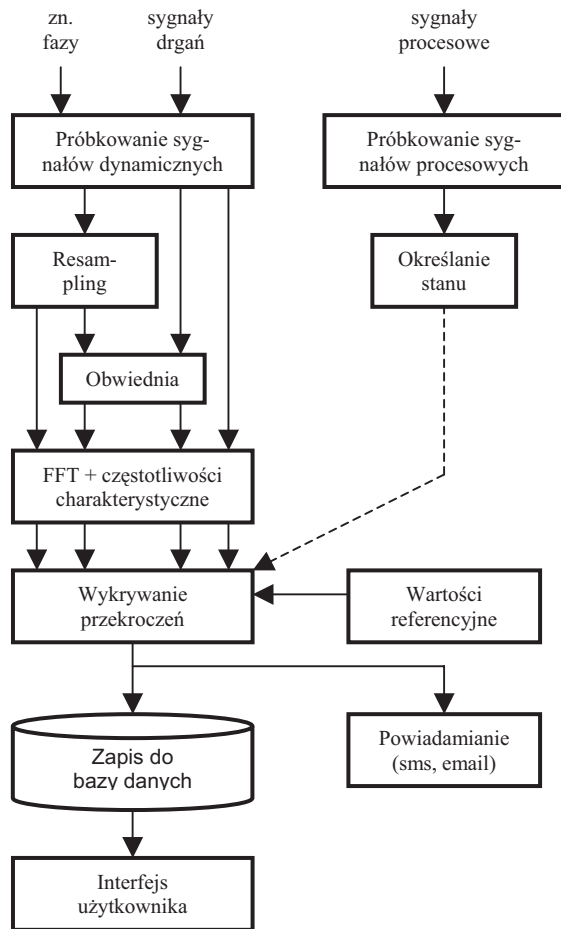
Systemy nadzoru maszyn nazywane są często systemami monitorowania i diagnostyki. Pojęcia te są różnie rozumiane przez różnych autorów. Dyskusję tego zagadnienia, (łącznie z innym często spotykanym podziałem metod na metody detekcji i lokalizacji uszkodzeń) można znaleźć np. w [13]. Najczęściej jednak zadania monitorowania obejmują akwizycję sygnałów z czujników drgań oraz działania algorytmów, w wyniku których otrzymywane są wartości określające pewne cechy sygnałów, określane jako najczęściej jako cechy (niem. *Merkmale*) [np. 12], bądź estymaty [np. 4] sygnału drganiowego.

Zadania diagnostyki z kolei mają na celu wykrycie uszkodzeń maszyn. Najczęstszą metodą jest porównanie wartości otrzymywanej w wyniku działania algorytmów monitorowania z wartościami odniesienia. W niektórych przypadkach algorytm ten jest bardzo skomplikowany i bazuje na np. modelu analitycznym, bądź modelu wyznaczanym za pomocą sieci neuronowych. Przegląd takich metod można znaleźć np. w [6, 11, 13].

W niniejszym punkcie przedstawione zostaną metody monitorowania maszyn. Propozycję koncepcji struktury systemu monitorowania przedstawia rysunek 1.

Źródłem danych dla monitorowania są umieszczone na maszynie czujniki. Dzielone są one na dwie grupy: czujniki sygnałów drganiowych (bądź, w ogólniejszym przypadku dynamicznych) – w skład tej grupy wchodzi również czujniki znacznika fazy, oraz czujniki sygnałów procesowych (określanych także jako wolnozmiennie). Grupy te różnią się częstotliwością

próbkowania, która dla sygnałów procesowych jest rzędu 1Hz, a dla dynamicznych – w granicach kilkuset Hz do kilkudziesięciu kHz.



Rys. 1. Schemat koncepcji monitorowania

Do pomiaru drgań maszyn stosuje się czujniki przemieszczenia, prędkości albo przyspieszenia drgań. W maszynach pomocniczych najczęściej stosowanymi czujnikami drgań są akcelerometry, z uwagi na wymagania montażowe, duży zakres mierzonych częstotliwości i małe wymiary. Najczęściej spotykanym typem wyjścia jest ICP. Czujniki te wymagają przetworników, które zamieniają sygnał z czujnika na sygnał dostosowany do karty pomiarowej. Najczęściej wyjście przetwornika jest w standardzie $\pm 10V$ bądź $4..20mA$.

Sygnał z przetwornika musi zostać podany na filtr antyaliasingowy, a następnie jest próbkowany przez przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC). Zgodnie z twierdzeniem Shanonna sygnał musi być próbkowany z częstotliwością równą co najmniej dwukrotności zawartej w nim najwyższej częstotliwości. W praktyce stosowane są częstotliwości próbkowania od kilkuset Hz do kilkudziesięciu kHz.

Spróbkowany sygnał musi zostać przetworzony, aby można było na jego podstawie wnioskować o stanie technicznym maszyny. Parametry otrzymane

z sygnału drganiowego są nazywane estymatami. Poniżej zostaną omówione wybrane, najczęściej stosowane estymaty. Należy tu również dodać, że spróbkowany sygnał drgań (surowy) zajmuje bardzo dużo pamięci operacyjnej i nie może być stosowany do śledzenia historii pracy maszyny. Najczęściej rejestrowane w bazie są tylko wybrane surowe dane.

Najprostszymi estymatami są takie, które niosą informację o podstawowych parametrach sygnału. Pozwalają one na wstępną ocenę jakościową stanu technicznego. Poniżej przedstawiono wybrane, często spotykane estymaty [3]:

wartość skuteczna (ang. root mean square),

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (8)$$

wartość szczytowa (ang. zero peak),

$$u_{zp} = \max_{0 < t < T} |u(t)| \quad (9)$$

wartość międzyszczytowa (ang. peak peak),

$$u_{pp} = \max_{0 < t < T} (u(t)) - \min_{0 < t < T} (u(t)) \quad (10)$$

współczynnik szczytu (ang. crest factor)

$$C = \frac{u_{zp}}{u_{rms}} \quad (11)$$

Aby wykorzystać wiedzę o związku uszkodzeń podzespołów mechanicznych z częstotliwościami charakterystycznymi potrzebne jest zastosowanie estymat dokładniejszych, odpowiadających uszkodzeniom wybranych elementów obiektu. Ponieważ częstotliwości odpowiadające tym uszkodzeniom mogą być bardzo bliskie, potrzebna jest bardzo wysoka rozdzielczość widma. W konsekwencji najczęściej stosowana jest analiza wąskopasmowa. Nie jest spotykana analiza oktawa ani tercjowa. Rozdzielczość widma zależy bezpośrednio od czasu zbierania wszystkich próbek do analizy, co powoduje wydłużanie czasu próbkowania (najczęściej poprzez zwiększanie liczby próbek przy zachowaniu odpowiedniej częstotliwości próbkowania). Najczęściej stosuje się czasy od kilkuset milisekund do kilkudziesięciu sekund, co pozwala na uzyskanie widma o rozdzielczości w zakresie ok. 2Hz ... 0.01Hz.

Analiza wąskopasmowa przeprowadzana jest przy użyciu szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Z otrzymanego widma wyznaczane są wartości energii dla częstotliwości charakterystycznych danego obiektu. Ponieważ, jak wspomniano wcześniej, potrzebne jest zarówno przeprowadzanie analiz w dziedzinie częstotliwości, jak i w dziedzinie rzędów, konieczne jest bądź próbkowanie sygnałów drgań synchronicznie z obrotami wału, bądź zastosowanie algorytmów resamplingu [2].

W przypadku, gdy sygnał użyteczny moduluje sygnał o dużo wyższej częstotliwości nie niosący informacji diagnostycznej konieczne jest dodatkowe

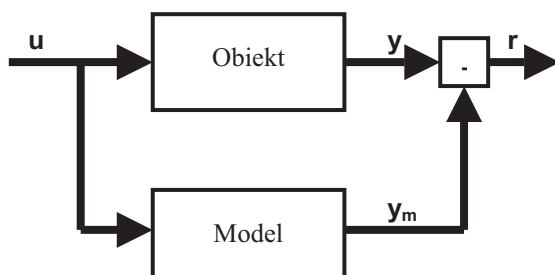
przetworzenie sygnału. Najczęstszym przypadkiem jest śledzenie rozwoju uszkodzeń bieżni łożysk tocznych, gdzie uderzenia elementów tocznych o ubytek w bieżni powoduje cykliczne wzbudzenie rezonansów strukturalnych łożyska. Dla potrzeb diagnostyki łożyska istotna jest znajomość nie samych rezonansów strukturalnych, a ich częstości występowania. Dodatkowym utrudnieniem jest fakt, że rezonanse te mają mały poziom sygnału w porównaniu do innych składowych tego sygnału. Zaproponowano liczne metody wykrywania tego typu uszkodzeń [np. 12, 14, 18]. Jedną z nich, jednocześnie prostą i skuteczną jest metoda analizy obwiedni sygnału (ang. *envelope*). Aby usunąć większość nieistotnych w tej analizie składowych najpierw sygnał poddawany jest filtracji górnoprzepustowej o stosunkowo wysokiej częstotliwości odcięcia, a następnie wyznaczana jest obwiednia sygnału. Obwiednia może być wyznaczana bądź przy użyciu transformaty Hilberta, bądź przez uśrednienie i filtrację dolnoprzepustową sygnału. Otrzymany sygnał obwiedni jest analizowany w dziedzinie rzędów, bądź częstotliwości, jak opisano powyżej.

4. ZADANIA DIAGNOSTYKI

W poprzednim paragrafie omówiono wyznaczanie wartości estymat sygnałów drganiowych. W niniejszym omówione zostaną metody diagnostyki. Najczęściej spotykaną metodą diagnozowania stanu technicznego maszyny jest porównywanie estymat z ich wartościami odniesienia, określanymi jako referencyjne. Często metoda ta jest nazywana generacją residuów [np. 13].

Charakter pracy maszyny najczęściej zależy od pewnych parametrów. Podstawowe zbiory punktów pracy nazywane są stanami. Stany maszyny zależą od głównych zmiennych stanu obiektu. Najczęściej tymi zmiennymi są prędkość obrotowa, moc, temperatury itp. Przykładowo, maszyna może mieć zdefiniowane następujące stany:

- postój
- rozbieg
- moc mała
- moc wysoka



Rys. 2. Metoda diagnostyki opartej na modelu

Nie tylko estymaty, ale także ich wartości referencyjne zależą silnie od stanu. W ogólnym

przypadku możliwe jest opracowanie algorytmu, który będzie działał dla wszystkich punktów pracy obiektu. Jest to inne przedstawienie metody diagnostyki opartej na modelu. W podejściu tym w ogólnym przypadku wartości residuów są otrzymywane jako różnica pomiędzy wyjściami obiektu a wyjściami modelu, jak przedstawiono na rysunku 2.

Zaproponowano wiele metod modelowania, w szczególności metody oparte o równania fizyczne, transmitancje, równania stanu, obserwatory, a także modele oparte o sieci neuronowe. Jednakże opracowanie takiego modelu, a szczególnie jego dostrojenie do obiektu, jest bardzo pracochłonne i w konsekwencji zbyt kosztowne.

Możliwe jest jednak podejście znacznie uproszczone. Jeżeli opracowanie estymat i residuów będziemy wykonywać tylko dla wybranych, najczęściej występujących lub najbardziej charakterystycznych stanów maszyny, możliwe jest zastosowanie dużo prostszych metod wyznaczania residuów. Najprostszymi wariantami są residua, dla których model ma postać funkcji stopnia zerowego, czyli wartości stałej.

W przypadku wartości stałej problem wyznaczania residuów sprowadzi się do wykrywania przekroczeń progów alarmowych, aktywnych dla danego stanu. Charakterystyki obiektu będą więc przybliżone rozbiciem na kilka stanów. W konsekwencji wykrywane będą przekroczenia progów przez estymaty sygnałów drganiowych. Koncepcja tworzenia zbioru wartości progów przedstawiona jest na poniższym schemacie.

Tab.2. Schemat tworzenia progów alarmowych

Stan	Estymata 1	Estymata 2	...	Estymata j
S1	L ₁₁	L ₁₂	...	L _{1j}
S2	L ₂₁	L ₂₂	...	L _{2j}
...
Si	L _{i1}	L _{i2}	...	L _{ij}

Dokładność metody można zwiększać poprzez definiowanie dużej liczby stanów. Z drugiej jednak strony zwiększy to nakład pracy na konfigurację algorytmu. Nawet dla niezbyt skomplikowanej maszyny, w której skład wchodzi trzy przekładnie i kilkanaście łożysk, wyznaczanych jest ok. 100 estymat. Dla każdego dodatkowego proggu oznacza to konieczność skonfigurowania ok. 100 dodatkowych progów alarmowych. W praktyce nie wszystkie progi są definiowane dla każdego stanu, co niezmiernie zmniejsza liczbę progów.

Przedstawiona powyżej koncepcja jest prosta, ale wymaga konfiguracji dużej liczby estymat sygnałów drganiowych i jeszcze większej liczby wartości progów alarmowych. W praktyce proces konfiguracji musi być zautomatyzowany, ponieważ w innym przypadku nie będzie wykonany. Pierwszą

częścią procesu jest skonfigurowanie częstotliwości charakterystycznych układu. Powinno się to odbywać po zdefiniowaniu układu kinematycznego maszyny, na podstawie którego algorytm powinien automatycznie wyznaczać częstotliwości analiz wąskopasmowych. Drugą częścią procesu jest określanie wartości progów alarmowych. Obecnie obowiązujące normy regulują jedynie dopuszczalne wartości skutecznej drgań i wartości szczytowej dla poszczególnych grup maszyn, nie odnosząc się jednak do wartości harmoniczných. Prostą do zastosowania automatyczną metodą jest algorytm wyznaczania wartości progów metodami statystycznymi na podstawie historii pracy maszyny. Wymaga on zebrania historii pracy zawierającej taką ilość danych, która pozwala na wyznaczenie wartości statystycznych. Jako metody statystyczne proponuje się zastosować wartość średnią x i odchylenie standardowe σ . Wartość progów L powinna być określona jako:

$$L = \bar{x} + n\sigma \quad (12)$$

gdzie wartość n jest dobierana podczas konfiguracji progów dla konkretnej maszyny. Domyślnie wartość n wynosi 3.5 (wartość otrzymana doświadczalnie). Oprogramowanie realizujące konfigurację wartości progów i wspomagające w tym użytkownika powinno sprawdzać, czy liczba punktów pomiarowych w wybranym stanie jest nie mniejsza od założonego progów, a także powinno przedstawiać graficznie wyznaczoną wartość progów alarmowych na tle danych, na podstawie których został on obliczony.

Do tej pory rozważono model uproszczony do wartości stałych. Kolejnym krokiem jest jego zdefiniowanie jako funkcji liniowych stopnia pierwszego albo – w bardzo podobnym przypadku – jako funkcji jednej zmiennej. W tym przypadku dla określonego stanu (np. nominalnej prędkości obrotowej) należy zdefiniować zależność estymat od kanałów procesowych lub innych estymat (np. druga harmoniczna sygnału drganiowego w zależności od mocy). W przypadku takim problem wyznaczenia modelu przedstawiającego nieuszkodzoną maszynę jako podprzestrzeni w wielowymiarowej przestrzeni stanów jest dekomponowany na zbiór wielu zależności w przestrzeniach dwuwymiarowych. Każda z tych zależności musi być dodatkowo ograniczona do wybranego stanu. Inaczej koncepcję tę można przedstawić jako tworzenie wielu charakterystyk XY maszyny i ich nadzór w czasie rzeczywistym. Ponieważ w praktyce istotne są tylko niektóre stany maszyny, liczba charakterystyk jest ograniczona, choć bardzo wysoka.

W przypadku zastosowania takiej metody wartością residuum jest wybrana miara odległości pomiędzy chwilowym punktem pracy a charakterystyką referencyjną. Zależy ona tak od wybranej miary, jak i od sposobu reprezentacji charakterystyki. Miary mogą być definiowane

w różnoraki sposób [4], dla potrzeb algorytmu proponuje się zastosować miarę najprostszą, podającą różnicę między chwilową wartością estymaty a jej wartością referencyjną dla tej samej wartości odciętej, tj.

$$r = y - y_r(x) \quad (13)$$

,gdzie:

x, y - wartości chwilowe,

y_r - funkcja opisująca charakterystykę referencyjną.

Osobnym problemem jest sposób reprezentacji charakterystyk referencyjnych. Podejście oparte na powyżej zaproponowanym opisie będzie przedmiotem badań.

5. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWAŃ

Zaproponowane podejście do monitorowania i diagnostyki jest szczególnie dostosowane do maszyn o małej i średniej mocy, ponieważ bardzo istotna jest w ich przypadku pracochłonność instalacji i konfiguracji. Koszty, które są akceptowane dla maszyn o dużej mocy, są za wysokie dla maszyn pomocniczych. Akceptowana jest natomiast niższa jakość diagnostyki.

Przykładami zastosowań dla systemu opartego na zaproponowanym podejściu może być np. monitorowanie i diagnostyka maszyn pomocniczych w energetyce, takich jak wentylatory ciągu, bądź młyny węglowe. Innym możliwym obiektem mogą być maszynownie lokomotyw i wózki pojazdów szynowych. Szybko rosnącą dziedziną zastosowań systemów monitorowania i diagnostyki jest energetyka wiatrowa [7]. W ostatniej dekadzie średni roczny wzrost mocy zainstalowanej wynosił ok. 20-30% [8, 9]. Na bazie zaproponowanej koncepcji opracowano eksperymentalny system monitorowania i diagnostyki specjalizowany do maszyn pomocniczych. System ten charakteryzuje się następującymi właściwościami:

- automatyczne wyznaczanie i konfiguracja częstotliwości charakterystycznych,
- zestaw zaawansowanych narzędzi analizy widmowej, dostosowanych do maszyn o zmiennej prędkości obrotowej,
- zestaw zaawansowanych narzędzi do wczesnego wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych,
- moduł automatycznego ustawiania progów alarmowych,
- baza danych rejestrująca historię pracy maszyny,
- interfejs użytkownika zoptymalizowany pod kątem zdalnego dostępu.

System realizuje algorytm przedstawiony na rysunku 2. Podstawowe analizy wykonywane są na podstawie przebiegu czasowego sygnału. Są to: wartość skuteczna, amplituda międzyszczytowa

i współczynnik szczytu. Następnie wyliczana jest szybka transformata Fouriera. Z otrzymanego widma wyznaczane są energie w pasmach wg automatycznie wyznaczonych częstotliwości charakterystycznych. Niezależnie z sygnału przebiegu czasowego wyznaczana jest jego obwiednia.

Następnie oba sygnały czasowe (zwykły i obwiednia) są poddawane resamplingowi. Po tym kroku otrzymywane są wartości sygnałów co ustalony kąt obrotu wału (np. 1/512 obrotu). Po wykonaniu FFT takiego sygnału otrzymane linie widmowe są reprezentowane w dziedzinie rzędów, a nie częstotliwości.

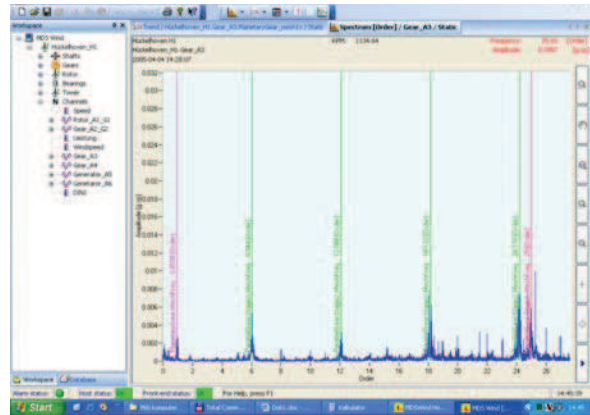
Interfejs użytkownika jest zaprojektowany jako oddzielna aplikacja, komunikująca się z podstawową częścią systemu. Został on zaprojektowany tak, aby jego obsługa była prosta i intuicyjna. Założono realizację następujących wykresów:

- wykres synoptyczny (przedstawiający schemat maszyny z naniesionymi wybranymi wartościami),
- tabeli danych, w której przedstawiane są wartości bieżące z wybranych kanałów,
- tabeli alarmów; możliwa jest filtracja zdarzeń wg ważności, okresu, potwierdzenia i źródła,
- przebiegu czasowego; możliwe jest prezentowanie oryginalnego przebiegu, jak i przebiegu czasowego jego obwiedni,
- widma sygnału; możliwe jest prezentowanie tego wykresu w dziedzinie częstotliwości, jak i w dziedzinie rzędów, zarówno dla sygnału oryginalnego, jak i dla obwiedni tego sygnału,
- trend; możliwe jest prezentowanie na jednym wykresie kilku kanałów jednocześnie oraz filtrowanie danych, tak aby prezentowane były dane tylko z jednego stanu maszyny.

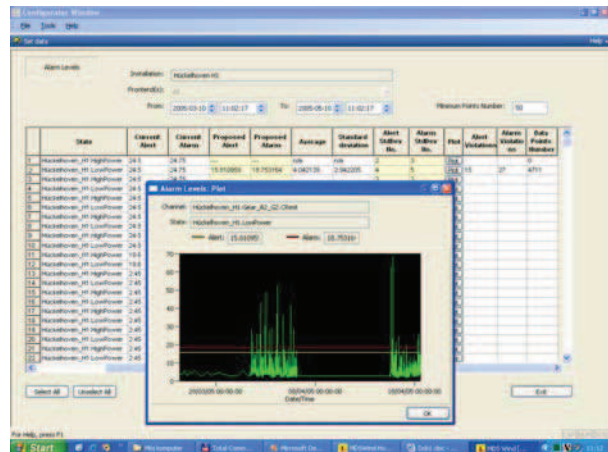
Poniżej zaprezentowano przykładowe wykresy, które zaimplementowano w systemie. Rysunek 3 przedstawia widmo wąskopasmowe po resamplingu, przedstawione w dziedzinie rzędów. Procedurę tworzenia wykresu widma wzbogacono o możliwość naniesienia na wykres pionowych linii odpowiadających częstotliwościom charakterystycznym maszyny wraz z ich harmonicznymi. Dodatkowo zaimplementowano również procedurę, która pozwala na znalezienie częstotliwości charakterystycznych, odpowiadających częstotliwości kursora na wykresie. Dzięki temu znacznie przyspieszono pracę diagnosty.

Rysunek 4 przedstawia wyniki implementacji procedury, która automatyzuje wyznaczanie wartości progów alarmowych. Diagnosta ma możliwość określenia przedziału czasu, z którego będą pobierane dane do analizy, krotności odchylenia standardowego, które zostanie użyte do wyznaczenia progu ostrzeżenia i alarmu, a także minimalnej liczby pomiarów, która jest niezbędna do wyznaczenia wartości statystycznych. Znaczną pomocą jest możliwość graficznego przedstawienia

proponowanych progów na tle wykresu z danymi. Po analizie danych i wykresu użytkownik może zaakceptować propozycję systemu, bądź wprowadzić własne wartości.



Rys. 3. Widmo wąskopasmowe z naniesionymi liniami odpowiadającymi



Rys. 4. Interfejs użytkownika procedury wspomagającej określenie wartości progów alarmowych

Opisany system jest testowany od jesieni 2004 roku na kilku maszynach w energetyce (wyposażonych w 3-stopniowe przekładnie i maszyny elektryczne). Okres prób pozwolił na sformułowanie dodatkowych następujących wymagań, które podniosą funkcjonalność systemu:

- automatyzacja procesu konfiguracji
- wykrywanie uszkodzeń czujników drgań
- uproszczenie obsługi
- konieczność automatycznego transferu danych do wybranej lokalizacji

Planuje się wprowadzenie powyższych uzupełnień podczas dalszych prac. Planowane jest również zastosowanie zaproponowanej koncepcji monitorowania i diagnostyki dla innych maszyn.

6. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcję nadzoru diagnostycznego nad maszynami o małej i średniej mocy, dla których nie są stosowane skomplikowane systemy stosowane do maszyn krytycznych. Opisano charakterystyczne cechy tych maszyn, a także przedstawiono estymaty najważniejsze z punktu zawartości informacji diagnostycznej.

W kolejnej części zaproponowano metodę diagnozowania uszkodzeń opartą na wyznaczaniu częstotliwości charakterystycznych obiektu oraz na podziale wielowymiarowej przestrzeni stanów maszyny na stany najistotniejsze. Dla stanów tych wyznaczone są wartości progów alarmowych dla poszczególnych estymat. Metoda ta jest koncepcyjnie prosta, ale wymaga pracochłonnej, choć nieskomplikowanej konfiguracji. Położono nacisk na automatyzację procesu konfiguracji.

Przedstawiono możliwości zastosowań oraz zaprezentowano wyniki implementacji metody do monitorowania rzeczywistego obiektu. Zaproponowano rozszerzenie metody o wprowadzenie nadzoru w oparciu o charakterystyki dwuwymiarowe oraz usprawnienia eksploatacyjne.

LITERATURA

- [1] Barszcz T.: „Nowoczesny system zbierania i przetwarzania danych w diagnostyce maszyn”. Praca doktorska, AGH, Kraków, 1997.
- [2] Barszcz T. „Proposal of the new method for mechanical vibration measurement”, *Metrology and Measurement Systems*, 12/2004
- [3] Bendat A., Piersol J.: *Przetwarzanie i analiza sygnałów losowych*. Biblioteka inżyniera, WNT Warszawa 1982.
- [4] Cempel Cz. „Podstawy wibroakustycznej diagnostyki maszyn”, WNT, Warszawa 1982
- [5] Cempel Cz., Cholewa W., Drobnik S., Kiciński J., Krzyżanowski J., Orłowski Z.: „Systemy diagnostyki turbozespołów energetycznych nowej generacji”, *Przegląd Mechaniczny*, no. 1-2, 1995.
- [6] Chiang L.H., Russel E.L., Braatz R.D. „Fault detection and diagnosis in industrial systems”, Springer, London, 2001
- [7] T.J. Clark, R.F. Bauer, J.R. Rasmussen, „Wind power comes of age”, *ORBIT* 2Q 2004
- [8] European Wind Energy Association, „Wind Energy. The facts. An analysis of wind energy in the EU-25”, EWEA, 2005
- [9] European Wind Energy Association, „Wind power continues to grow in 2004 in the EU”, EWEA, 2005
- [10] R. C. Eisenmann, „Machinery Malfunction Diagnosis and Correction”. Hewlett Packard Professional Books, 1997.
- [11] Gertler J. „Fault detection and diagnosis in engineering systems”, Dekker, New York, 1998
- [12] U. Klein, „Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen”, Stahl Eisen Verlag, Duesseldorf, 2003
- [13] Kościelny J. M.: *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*, EXIT, 2001
- [14] Nowak J., Saarinen K., Orkisz M., Wnęk M. „Integracja zadań diagnostyki i sterowania na przykładzie systemu do monitorowania łożysk głównych napędów okrętowych”, materiały konferencji Diagnostyka Procesów Przemysłowych, Rajgród, 09.2005
- [15] Randall R.B.: *Frequency Analysis*. Bruel & Kjaer, Naerum, 1987.
- [16] Reeves Ch. W.: *The Vibration Monitoring Handbook*. Coxmoor Oxford 1998.
- [17] *Trendmaster goes Pro*. ORBIT 2/2004.
- [18] www.spminstruments.com



Dr inż. Tomasz BARSZCZ pracuje jako adiunkt w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn Akademii Górniczo-Hutniczej. Zajmuje się diagnostyką techniczną w energetyce (głównie wibrodiagnostyka, układ regulacji). Bierze udział w projektowaniu i wdrażaniu systemów diagnostycznych.