

## AUTONOMICZNY UKŁAD DIAGNOSTYCZNY IDENTYFIKACJI ZAGROŻEŃ I MINIMALIZACJI RYZYKA W UKŁADACH TECHNICZNYCH

Jędrzej MĄCZAK

Instytut Podstaw Budowy Maszyn, Politechnika Warszawska  
Narbutta 84, 02-524 Warszawa, fax: 022 660 8622, email: jma@simr.pw.edu.pl

Arkadiusz ROSZCZEWSKI

Instytut Fizyki, Politechnika Warszawska, Warszawa  
email: arcady@if.pw.edu.pl

### Streszczenie

W artykule omówiono problemy występujące podczas tworzenia autonomicznych systemów diagnostycznych pozwalających na samodzielne podejmowanie decyzji eksploatacyjnych w zależności od aktualnego stanu technicznego maszyny. Przedstawiono przykład wielowątkowej struktury programowej takiego układu oraz omówiono problem doboru odpowiednich procedur diagnostycznych w zależności od aktualnego rodzaju pracy maszyny z podziałem na stacjonarne i niestacjonarne typy pracy. Przedstawiono również problemy występujące przy doborze właściwej platformy sprzętowo-programowej oraz założenia wykorzystania informacji diagnostycznej w zagadnieniu minimalizacji ryzyka technicznego.

Słowa kluczowe: autonomiczne układy diagnostyczne, minimalizacja ryzyka, diagnostyka maszyn.

### AUTONOMOUS DIAGNOSTIC UNIT FOR THREAT IDENTIFICATION AND RISK MINIMIZATION IN TECHNICAL SYSTEMS

#### Summary

In the paper the problems that took place during the development of autonomous diagnostic units capable of performing exploitation decisions according to the current machine state were presented. An example of multithread programming structure of such unit as well as a problem of selection of diagnostic procedures in dependence of actual type of machine behavior with special respect to stationary and nonstationary was described. The problems of selecting correct hardware-software platform were also presented. Additionally the assumptions of use of diagnostic information in the task of technical risk minimization were presented.

Keywords: autonomous diagnostic units, risk minimization, machine diagnostic.

## 1. WSTĘP

Celem pracy jest przedstawienie problemów występujących podczas opracowywania projektu działania oraz praktycznej realizacji autonomicznego układu diagnostycznego maszyny zdolnego do ingerowania w pracę maszyny. Układ taki jest zdolny do samodzielnego diagnozowania stanu technicznego maszyny, w szczególności maszyny wirującej i podjęcia określonych działań w celu wykrycia zagrożeń mogących powodować awarię. W przypadku wykrycia uszkodzenia stwarzającego ryzyko dalszej pracy układ jest zdolny do podjęcia działań pozwalających na uniknięcie lub zminimalizowanie konsekwencji awarii.

Osiągnięcia techniki w ciągu ostatnich lat oprócz zwiększenia funkcjonalności produkowanych urządzeń spowodowały rozwój tzw. konstrukcji inteligentnych, czyli konstrukcji zdolnych do samodzielnego określania swojego stanu

technicznego [1,2] i uwzględniania tego stanu podczas podejmowania decyzji odnośnie warunków dalszej pracy. Konstrukcje te wyposażone są w układy diagnostyczne działające według algorytmu w którym można wydzielić następujące etapy:

1. detekcja uszkodzenia,
2. lokalizacja uszkodzenia,
3. identyfikacja uszkodzenia i ew. ocena stopnia krytyczności uszkodzenia,
4. zmiana parametrów pracy maszyny jako reakcja na zdiagnozowane uszkodzenie
5. prognozowanie pozostałego „czasu życia” urządzenia.

Jak widać omawiane układy stanowią rozszerzenie „typowego” układu diagnostycznego o dodatkowe moduły pozwalające na automatyczną modyfikację parametrów pracy maszyny w zależności od jej aktualnego stanu technicznego. Układy takie można stosować wszędzie tam, gdzie uszkodzenie mogłoby spowodować duże straty

w tym zagrożenie życia ludzkiego. Dokonujący się obecnie postęp w diagnostyce technicznej w połączeniu z rozwojem techniki mikroprocesorowej i piezoelektryków pozwala na opracowanie nowych metod umożliwiających sformułowanie bardziej wiarygodnej prognozy zmian stanu technicznego i tym samym pozwalających na podejmowanie decyzji eksploatacyjnych ze znacznym wyprzedzeniem. Równocześnie mniejsze koszty tego typu układów umożliwiają ich zastosowanie w obiektach technicznych o mniejszym zagrożeniu dla otoczenia i stosunkowo niskiej cenie jak np. układy napędowe.

Podstawą budowy autonomicznego układu diagnostycznego są sterowniki mikroprocesorowe będące w rzeczywistości analizatorami sygnałów wyposażonymi w układy wejściowe (kondycjonery sygnałów) dopasowane do stosowanych przetworników sygnałowych oraz posiadające możliwość rejestracji parametrów procesowych pracy maszyny takich jak prędkość, obciążenie czy sygnały sterujące jej pracą. Część niezbędnych sygnałów procesowych może być pobierana bezpośrednio z istniejącego układu sterowania urządzenia, zaś brakująca część powinna być mierzona dodatkowo rozmieszczonymi przetwornikami. Sterownik musi zatem mieć możliwość odbioru (rejestracji) sygnałów z różnego typu czujników począwszy od przetworników drgań w standardzie ICP, przetworników temperatury, ciśnienia i prądu zasilającego (zazwyczaj w standardzie Pt100, 0-20, 4-20 lub rzadziej 0-5 mA), sygnałów napięciowych 0-5V a na sygnałach z przetworników tensometrycznych skończywszy. Dodatkowo część sygnałów jak sygnały z przetworników ciśnienia i temperatury to sygnały wolnozmiennie dla których wystarczy częstotliwość próbkowania poniżej 1 Hz, zaś pozostałe to sygnały szybkozmiennie, które muszą być próbkowane z częstotliwością właściwie dobraną do zakresu ich zmienności (orientacyjnie zazwyczaj 5-10 kHz). Złożoność ta powoduje istotne utrudnienia w doborze odpowiedniego sprzętu zwłaszcza, że zazwyczaj mamy do czynienia z konkretną, działającą maszyną wyposażoną w określoną automatykę sterującą jej pracą. Dodatkowo, wszystkie układy wejściowe i wyjściowe sterownika muszą być izolowane galwanicznie od samej maszyny aby uniknąć uszkodzenia układów wejściowych przez prądy błądzące. Sterownik musi ponadto być wyposażony w moduł wykonawczy pozwalający na modyfikację parametrów pracy maszyny w przypadku zidentyfikowania zagrożenia awarią.

Przykładowo, w tabeli 1 przedstawiono hipotetyczny zestaw parametrów procesowych i diagnostycznych oraz sygnałów sterujących pracą pozwalający na podejmowanie skutecznych decyzji eksploatacyjnych dla napędu wentylatora dużej mocy składającego się z silnika synchronicznego osadzonego na dwóch łożyskach ślizgowych połączonego sprzęgłem podatnym z wirnikiem

osadzonym na dwóch łożyskach tocznych. Zestaw ten pozwala na ocenę aktualnego rodzaju (rozruch, praca, wybieg) i rodzaju (ustalony, nieustalony) pracy wentylatora oraz jego aktualnego stanu technicznego. Na tej podstawie możliwe jest automatyczne podejmowanie decyzji eksploatacyjnych polegających na zmianie obciążenia wentylatora poprzez zwiększenie lub zmniejszenie wydatku tłoczonego powietrza za pomocą dławienia przepływu w układzie dolotowym lub wyłączenia wentylatora w przypadku wykrycia poważnej awarii. Układ sterowania parametrami maszyny powinien być zintegrowany z jej automatyką sterującą.

Tab.1. Hipotetyczny zestaw parametrów procesowych i diagnostycznych

L.p.	Mierzony parametr	Typy przetworników	Liczba kanałów
Parametry procesowe			
1.	Sygnał włączenia (pracy)	Cyfrowy	1
2.	Ciśnienie tłoczenia/ssania jako miara obciążenia maszyny	4-20 mA 0-5 mA	1
3.	Położenie kierownicy dławiącej przepływ powietrza	4-20 mA 0-5 mA	1
Parametry diagnostyczne			
1.	Temperatury uzwojeń silnika	4-20 mA 0-5 mA lub Pt100	3
2.	Ciśnienie oleju w łożyskach ślizgowych	4-20 mA 0-5 mA	2
3.	Temperatury łożysk	Pt100	4
4.	Prędkość obrotowa (znacznik fazy)	0-24V (0-5V)	1
5.	Przyspieszenia drgań kołowych łożyskowych w dwóch płaszczyznach	ICP	8
6.	Prąd główny silnika (3 fazy)	4-20 mA 0-5 mA	3
Sygnały sterujące			
1.	Sygnał wyłączenia (zatrzymania)	cyfrowy	1
2.	Sygnał sterowania aparatem kierowniczym regulującym wydatek powietrza (zmiana obciążenia)	4-20 mA 0-5 mA	1
3.	Sygnały sterowania prędkością obrotową	Przełącznik sterowany cyfrowo	2
4.	Sygnalizacja stanu technicznego	Przełącznik sterowany cyfrowo	3

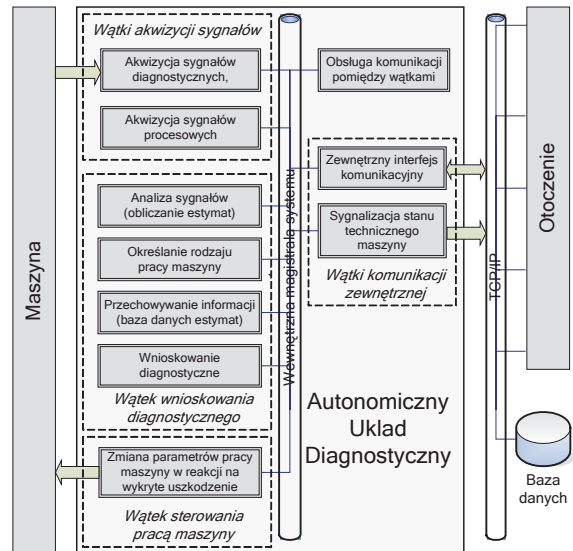
## 2. WYBRANE PROBLEMY REALIZACJI STRUKTURY FUNKCJONALNEJ UKŁADU

Jedną z możliwych struktur funkcjonalnych autonomicznego układu diagnostycznego przedstawiono na rys. 1. Składa się ona z szeregu wątków programowych wykonywanych niezależnie od siebie przy czym przepływ informacji pomiędzy

tymi wątkami jest koordynowany przez osobny moduł komunikacyjny. W szczególności można tu wyróżnić wątki akwizycji sygnałów dynamicznych i procesowych, wątki związane z analizą zarejestrowanych sygnałów, wątek sterowania pracą maszyny oraz wątki obsługujące komunikację z otoczeniem przez sieć TCP/IP i obsługę bazy danych. Takie rozwiązanie pozwala na rezygnację z synchronicznego wykonywania operacji, a szczególnie pozwala na uniezależnienie akwizycji i analizy sygnałów od ich dalszej interpretacji w celu określenia stanu technicznego maszyny. Układ ma możliwość komunikacji z otoczeniem poprzez sieć TCP/IP w celu informowania o aktualnym stanie technicznym i podjętych decyzjach eksploatacyjnych. Sieć może także być wykorzystana do komunikacji z zewnętrzną bazą danych przechowującą przetworzone wyniki pomiarów oraz informacje o stanie technicznym i pracy urządzenia. Takie rozwiązanie pozwala odciążyć sterownik od konieczności bezpośredniej obsługi bazy danych co pozwala na zmniejszenie wymagań sprzętowych sterownika. Zewnętrzna baza danych może być wykorzystywana jednocześnie przez wiele układów diagnostycznych co dodatkowo obniża koszty, a także umożliwia wymianę informacji pomiędzy układami nadzorującymi pracę podobnych urządzeń oraz pozwala na łatwiejszy dostęp do informacji o przebiegu ich pracy. Z uwagi na ograniczenia sprzętowe oraz konieczność minimalizacji przekazywanego strumienia informacji w bazie trzymane są wyłącznie informacje przetworzone w postaci estymat sygnałów i innych wskaźników obliczonych na podstawie zarejestrowanych sygnałów charakterystycznych dla potencjalnie możliwych uszkodzeń. Istotne jest zapewnienie prawidłowości pracy systemu (przynajmniej podstawowym zakresie) nawet w przypadku chwilowego braku dostępu do sieci. W takim przypadku system musi potrafić po odzyskaniu łączności zaktualizować bazę danych o wielkości obliczone w czasie braku połączenia.

Komunikacja z otoczeniem poprzez sieć TCP/IP, stosowana coraz częściej w układach diagnostyki przemysłowej [3], pozwala ponadto na dostęp do systemu z dowolnego miejsca zarówno wewnątrz zakładu przemysłowego jak i z poza niego. Możliwe jest także dzięki temu wyposażenie systemu w układ automatycznego powiadamiania obsługi i nadzoru o zaistniałych zdarzeniach przez e-mail czy SMS.

W niniejszej pracy pominięto rozważania na temat układów wejściowych tj. przetworników i układów kondycjonujących skupiając się raczej na sposobach przetwarzania danych i strukturze wewnętrznej systemu.



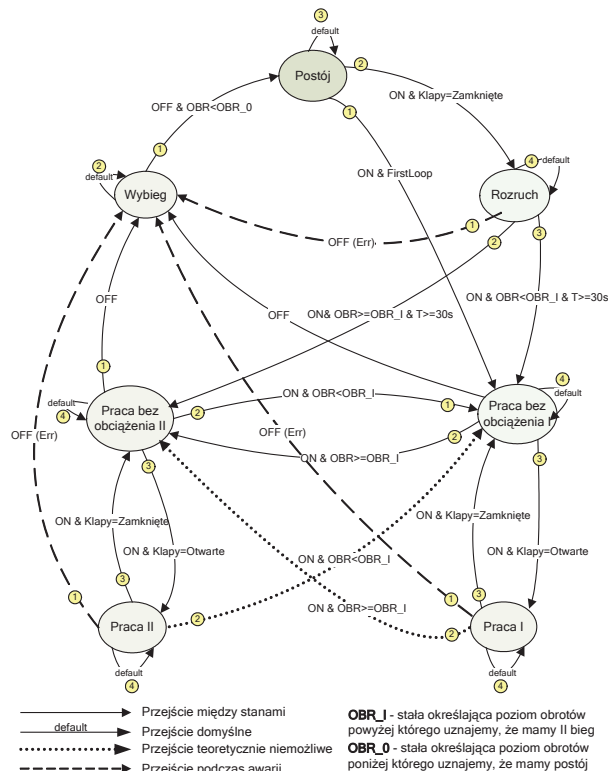
Rys. 1. Wielowątkowa struktura autonomicznego układu diagnostycznego

### 3. ŚLEDZENIE AKTUALNEGO TYPU PRACY MASZINY

Skuteczna diagnostyka stanu technicznego maszyny i automatyczne podejmowanie przez autonomiczny system diagnostyczny decyzji o kontynuacji eksploatacji wymaga znajomości aktualnego jej typu pracy. Rozróżnić należy zwłaszcza pracę stacjonarną i niestacjonarną jako czynnik decydujący o przyjętych algorytmach przetwarzania informacji diagnostycznej. Stanami pracy niestacjonarnej są zwykle rozruch i wybieg lecz także stany przejściowe podczas przejść pomiędzy stacjonarnymi rodzajami pracy. Dotyczy to zwłaszcza maszyn, które mogą pracować z różnym obciążeniem (np. wentylatory w których wydatek powietrza można płynnie regulować za pomocą kierownic dławiących przepływ) lub różnymi prędkościami obrotowymi (silniki dwubiegowe). Można wówczas wyróżnić szereg różnych stacjonarnych typów pracy, których znajomość jest konieczna, aby właściwie ocenić obciążenie maszyny i móc prawidłowo określić poziomy ostrzegawcze i graniczne obliczonych parametrów diagnostycznych, uwzględniające warunki pracy. System diagnostyczny musi na bieżąco śledzić parametry pracy urządzenia w taki sposób, aby móc wykluczyć rejestrację sygnału w chwili przejść pomiędzy różnymi stacjonarnymi rodzajami pracy. W przeciwnym razie istnieje możliwość pojawienia się błędów pomiarowych, spowodowanych pojawieniem się chwilowej niestacjonarności (np. rozmycie widma spowodowane zmianami prędkości obrotowej) lub dodatkowych uderzeń w sygnale, spowodowanych zmianami warunków pracy maszyny.

Na rys. 2 przedstawiono przykładowy diagram przejść pomiędzy rodzajami pracy maszyny wirnikowej napędzanej dwubiegowym silnikiem synchronicznym, mogącej pracować z dwiema

różnymi prędkościami pod obciążeniem („Praca I”, „Praca II”) lub bez obciążenia. Zmiany obciążenia maszyny można dokonywać poprzez zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika, przejście z drugiego na pierwszy bieg lub zdławienia przepływu powietrza za pomocą kierownic umieszczonych w układzie dolotowym. Określenia, w jakim stanie pracy znajduje się w danej chwili maszyna można dokonać poprzez pomiar odpowiednich parametrów procesowych i diagnostycznych (prędkość obrotowa, kąt otwarcia kierownic w układzie dolotowym i ciśnienie w kanale dolotowym wentylatora).



Rys. 2. Przykładowy diagram przejść między różnymi rodzajami pracy maszyny na przykładzie wentylatora dwubiegowego

#### 4. DOBÓR ODPOWIEDNIH PROCEDUR DIAGNOSTYCZNYCH

##### 4.1 Metody detekcji i diagnozy uszkodzeń

Metody detekcji i diagnozy można podzielić na dwie grupy [4]:

1. metody oparte na analizie symptomów (diagnostyka symptomowa),
2. metody wsparte modelami matematycznymi (diagnostyka wsparta modelowo).

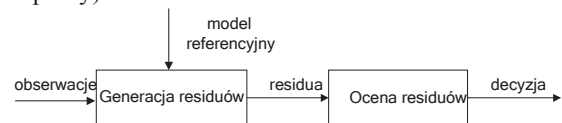
W przypadku pierwszym, zmiany stanu technicznego powodują zmiany parametrów diagnostycznych. Po przeprowadzeniu wnioskowania diagnostycznego określa się związek: symptom  $\Leftrightarrow$  stan techniczny maszyny.

$$y = Ax \Rightarrow x = A^{-1}y \quad (1)$$

gdzie  $y$  jest symptomem stanu technicznego  $x$ .

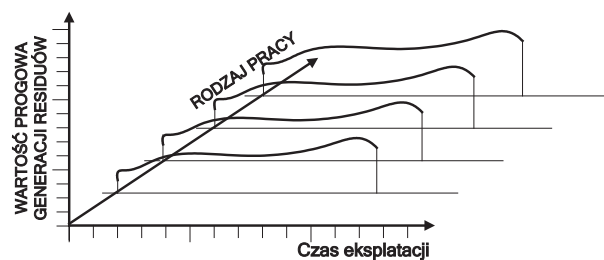
W przypadku diagnostyki wspartej modelowo [5], model referencyjny reprezentuje poprawną pracę urządzenia, a odpowiednie wielkości symulowane porównywane są z mierzonymi. Powstające różnice zwane reszduami (rys. 3) są wskazówkami odnośnie istnienia błędów (uszkodzeń) w układzie.

W przypadku diagnostyki obiektów technicznych zazwyczaj problemem jest określenie odpowiednio dokładnego modelu pracy maszyny. Modelem takim może być model matematyczny, opisujący za pomocą różniczkowych równań ruchu zachowanie maszyny, model degradacyjno-zmęczeniowy, funkcjonalny lub też model opisujący cechy osobnicze obiektu w stanie początkowym (zdatnym do pracy).



Rys. 3. Schemat procesu generowania sygnału residualnego

Najprostszym modelem może być w szczególnym przypadku wartość stała (model stopnia zerowego) [6]. W przypadku takiego modelu istotne jest uwzględnienie zależności wielkości parametru od aktualnego rodzaju pracy oraz czasu eksploatacji maszyny (rys. 4). W zależności od nich należy również dobrać odpowiednie algorytmy oceny stanu technicznego maszyny. Można też określić wartości progowe powyżej których konieczne będzie korzystanie z diagnostyki wspartej modelowo zależne od czasu eksploatacji i unikalne dla każdego rodzaju pracy.



Rys. 4. Określanie progowej wartości generacji reszduów w zależności od rodzaju pracy i czasu eksploatacji

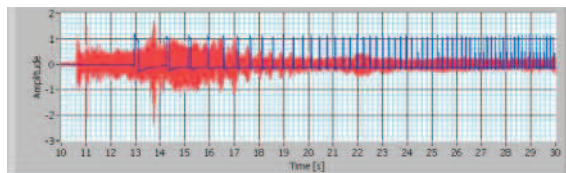
##### 4.2. Stany pracy niestacjonarnej

Jak wspomniano powyżej do stanów niestacjonarnych można zaliczyć przede wszystkim rozruch i wybieg maszyny. Analiza pracy niestacjonarnej podczas rozruchu i wybiegu pozwala na obserwację jej zachowania w czasie pracy ze zmienną prędkością obrotową, co powoduje dodatkowe pobudzenia odpowiedzi układu podczas przechodzenia przez kolejne rezonanse konstrukcji. Dodatkowo, podczas rozruchu zwykle występują

przeciążenia pozwalające na obserwację podatności i luzów na sprzęgłach i łożyskach. Aby móc obserwować te zjawiska konieczne jest zastosowanie odpowiednich metod analizy sygnałów. Poniżej przedstawiono wybrane metody analizy pracy niestacjonarnej, szczególnie użyteczne do zastosowania w autonomicznym układzie diagnostycznym.

#### 4.2.1. Analiza zmian prędkości obrotowej

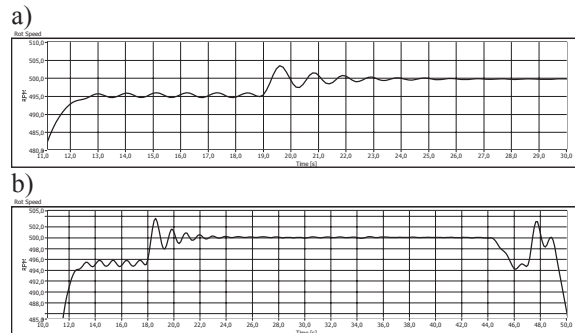
Pomiaru chwilowej prędkości obrotowej można dokonać poprzez rejestrację i analizę impulsów znacznika fazy związanego z obracającym się wałem (rys. 5). Zazwyczaj, z uwagi na prostotę konstrukcji, łatwość montażu i małą awaryjność, stosuje się do tego celu czujniki indukcyjne. Jeżeli zależy nam na większej dokładności pomiaru, można wymusić generację impulsu znacznika kilka razy na jeden obrót wału. Należy w takim przypadku uwzględnić możliwość do uzyskania tolerancję kątową ustawienia na wale elementów metalowych (o dużej indukcyjności) wymuszających impulsy oraz porównać ją ze spodziewanymi chwilowymi zmianami prędkości gdyż jak wynika z doświadczeń autorów, odpowiednio wysoka dokładność ich ustawienia może być niemożliwa do uzyskania w warunkach przemysłowych. Lepszym rozwiązaniem, aczkolwiek trudniejszym w realizacji z uwagi na konieczność dostępu do końca wału, jest wykorzystanie enkoderów inkrementalnych.



Rys. 5. Przebieg przyspieszeń drgań korpusu i znacznika położenia wału podczas rozruchu maszyny

Enkodery, przypominające wyglądem prądniczek tachometryczne, są kompletnymi, zabudowanymi układami mechaniczno-elektrycznymi stosowanymi w automatyce przemysłowej do pozycjonowania elementów obrotowych z dużą dokładnością potrafiącymi generować od kilku do kilkudziesięciu tysięcy (np. 25600) prostokątnych impulsów elektrycznych TTL lub 24V na jeden obrót. Mocowane są do wolnego czopa wału za pomocą małych sprzęgieł o dużej sztywności skrętnej.

Pomiar zmian prędkości obrotowej podczas rozruchu dla przypadku napędu synchronicznego pozwala na analizę prawidłowości i czasu trwania procesu synchronizacji silnika. W przypadku niepowodzenia tego procesu pozwala na określenie jego przyczyn. Na rys. 6a przedstawiono przykładowy przebieg zmian prędkości obrotowej podczas prawidłowego rozruchu synchronicznego napędu dużej mocy zaś na rys. 6b analogiczny rozruch zakończony utratą synchronizacji i zatrzymaniem maszyny.



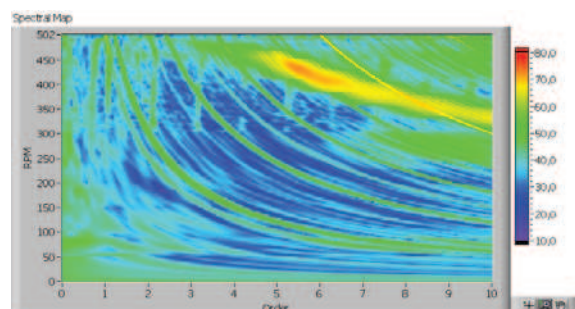
Rys. 6. Analiza zmian prędkości obrotowej podczas prawidłowego (a) i nieprawidłowego (b) rozruchu synchronicznego

#### 4.2.2. Analiza zmian prądu rozruchowego

W przypadku napędów dużej mocy możliwość pomiaru prądu rozruchowego pozwala na ocenę zarówno stanu technicznego samego napędu, jak też na ocenę oporów tarcia i sił bezwładności całego układu. Z uwagi na występowanie w obwodach dużych napięć konieczne jest zastosowanie izolacji galwanicznej pozwalającej na pewne (bezpieczne) odseparowanie torów pomiarowych od badanego obiektu.

#### 4.2.3. Analiza przyspieszeń drgań korpusu

Z uwagi na niestacjonarność procesu rozruchu/wybiegu niemożliwe jest zastosowanie do jego oceny klasycznej analizy widmowej. Analiza częstotliwościowa musi w takim przypadku uwzględniać chwilowe zmiany prędkości obrotowej. Najlepiej do tego celu zastosować analizę rzędów (rys. 7) przeprowadzaną z wykorzystaniem opisanego w podrozdziale 4.2.1 znacznika fazy. Obserwacja zmian poziomu poszczególnych harmonicznych przy zmiennej prędkości obrotowej pozwala na określenie częstotliwości rezonansowych układu. Zmiana ich położenia świadczyć będzie o zmianie sztywności (lub masy) odpowiednich elementów obiektu. Niestety z uwagi na duże rozmiary struktur danych i długi czas obliczeń zastosowanie analizy rzędów w układzie automatycznej diagnostyki jest znacznie utrudnione.



Rys. 7. Wyniki analizy rzędów dokonanej podczas rozruchu (patrz rys. 5)

W podanym przykładzie, analiza rozruchu trwającego ok. 50 sekund powoduje wygenerowanie mapy o rozmiarze 6000x500 dla każdego kanału drganiowego. Alternatywą jest obserwacja zmienności poziomu wybranych harmonicznym podczas zmiany prędkości obrotowej, pozwalająca na lokalizację rezonansów konstrukcji.

Prostsza metoda jest obserwacja wartości szczytowej przyspieszeń drgań podczas rozruchu lub określenie maksymalnego uderzenia występującego w tym okresie. Na tej podstawie można wnioskować o stanie sprzęgieł w układzie napędowym, a także o luzach na łożyskach wałów.

#### 4.3. Stany pracy stacjonarnej

W przypadku pracy stacjonarnej można stosować klasyczną, wąskopasmową analizę widmową, pozwalającą na obserwację charakterystycznych częstotliwości związanych z kinematyką maszyny (częstotliwości obrotowe wałów, częstotliwości ząbienia, łopatkowe itd.) oraz częstotliwości charakterystycznych dla występowania poszczególnych uszkodzeń np. częstotliwości uszkodzeń łożysk. Szczegółowe informacje pozwalające na określenie tych częstotliwości można znaleźć w pozycji [7] oraz na stronach internetowych producentów łożysk. Analiza pasm wokół częstotliwości łopatkowych i ząbienia pozwala na określenie stopnia zużycia tych elementów, gdyż ich postępująca degradacja powoduje powstawanie zjawisk modulacyjnych. Z kolei poziom kolejnych harmonicznym częstotliwości obrotowej wału niesie informację o deformacjach wału oraz stanie sprzęgła napędowego (parz tabela I). Z uwagi na możliwość wystąpienia chwilowych zmian prędkości obrotowej, powodujących „rozmycie” prążków widmowych, zazwyczaj zamiast klasycznej analizy widmowej stosuje się analizę rzędów wykonywaną z uwzględnieniem położenia kąтового wału [8]. Autorzy wykonując analizę rzędów zazwyczaj korzystają z opisanej w [9] metody synchronicznego uśredniania widma polegającej na przepróbkowaniu (resamplingu) fragmentów sygnału odpowiadających poszczególnym obrotom w taki sposób aby uzyskać jednakową długość obrotów wyrażoną w liczbie próbek. Następnie kolejne takie fragmenty są uśredniane co pozwala na uzyskanie uśrednionego przebiegu pojedynczego obrotu wału który można poddać transformacji Fouriera uzyskując uśrednione widmo o rozdzielczości odpowiadającej pojedynczemu rzędowi (częstotliwość obrotowa). Na wykresie widmo takie ma zatem postać histogramu amplitud odpowiadających poszczególnym częstotliwościom. Zaletą tej metody jest możliwość porównywania zmian uśrednionych przebiegów w czasie pracy maszyny oraz łatwy dostęp do rzeczywistego poziomu poszczególnych harmonicznym (brak rozmycia widma), natomiast wadą eliminacja częstotliwości nie będących wielokrotnością

częstotliwości obrotowej (np. częstotliwości charakterystyczne dla uszkodzeń łożysk).

Poniżej w tabeli 2 zebrano typowe błędy wykonania i montażu związane z pracą maszyny wirującej, składającej się z silnika elektrycznego i wału wirnika połączonych sprzęgłem podatnym. W tabeli 2 X oznacza częstotliwość obrotową wału (rząd) zaś znakiem ++ oznaczono podwyższony (lub znacznie podwyższony) poziom składowej sygnału o odpowiedniej częstotliwości.

Oprócz widma, użyteczną informację diagnostyczną niosą takie estymaty sygnału jak RMS, wartość szczytowa i współczynnik szczytu.

Tab. 2. Zestawienie błędów wykonania i montażu

	Kierunek promieniowy		Kierunek poosiowy	
	Łożysko I	Łożysko II	Łożysko I	Łożysko II
Niewyrównoważenie statyczne wirnika	1X++	1X++	-	-
Niewyrównoważenie, wirnik przewieszony	-	1X++	-	1X++
Bicie promieniowe	1X++	1X++	-	-
Niewspółosiowość wałów	1X+ 2X++	1X+ 2X++	1X 2X	1X 2X
Przekoszenie kątowe wałów	1X+ 2X+ 3X	1X+ 2X+ 3X	1X++ 2X+	2X+ 2X+
Luzy łożyskowe	1X..10X	-	-	-
Luźne mocowanie podpór	1X++	-	1X	-

#### 4.3. Podsumowanie rozdziału 4

Reasumując, skuteczną diagnostykę stanu maszyny wirującej można prowadzić analizując:

- poziom RMS przyspieszeń i prędkości drgań,
- wartość szczytową przyspieszeń i prędkości,
- współczynnik szczytu przyspieszeń i prędkości,
- poziom drgań pierwszych trzech harmonicznym prędkości obrotowej (analiza synchroniczna),
- widmo prędkości i przyspieszeń drgań,
- temperaturę łożysk,
- temperaturę uzwojeń silnika,
- prąd rozruchowy silnika,
- chwilowe zmiany prędkości obrotowej.

Zwłaszcza poziom RMS jest często wykorzystywany do oceny ogólnego stanu maszyny. Norma ISO 2372(10816) i oparta na niej Polska Norma PN -90/N-01358 określają zalecane dopuszczalne poziomy RMS prędkości drgań w zależności od wielkości maszyny. Wielkości te można wykorzystać jako pierwsze przybliżenie przy określaniu wartości granicznych. Z uwagi na to, że zazwyczaj w torach pomiarowych stosuje się przetworniki przyspieszeń drgań, a przy obserwacji niskich częstotliwości korzystniejsza jest obserwacja prędkości drgań, konieczne jest zaimplementowanie w systemie algorytmu całkowania numerycznego.

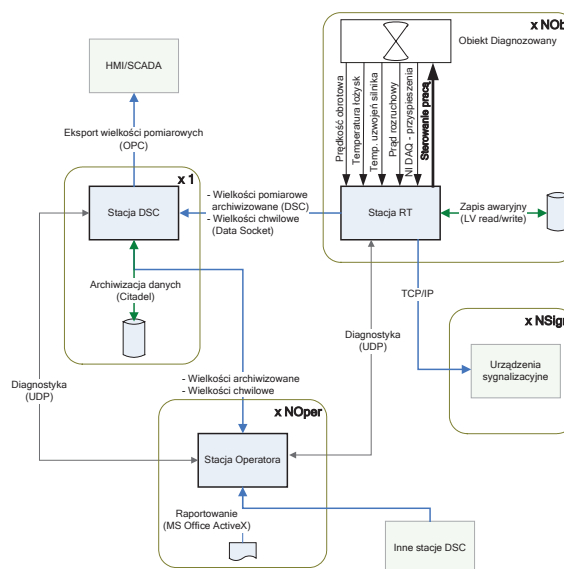
## 5. PROBLEM DOBORU WŁAŚCIWEJ PLATFORMY SPRZĘTOWO-PROGRAMOWEJ AUTONOMICZNEGO UKŁADU DIAGNOSTYCZNEGO

Prawidłowy dobór platformy sprzętowo-programowej użytej do budowy autonomicznego układu diagnostycznego jest niezwykle istotny dla czasu tworzenia aplikacji i jej prawidłowego oraz bezawaryjnego działania. Zgodnie z uwagami zawartymi we wstępie pracy sterownik programowany użyty do budowy musi spełniać szereg warunków:

1. Szybkość działania (między innymi zegar procesora) dostosowana do implementowanych algorytmów diagnostycznych i uwzględniająca ilość jednocześnie przetwarzanych kanałów. Wiąże się z tym rozmiar pamięci operacyjnej systemu. Wielkości te muszą być prawidłowo oszacowane przed przystąpieniem do tworzenia systemu, gdyż zbyt mała ilość zasobów systemowych może utrudniać tworzenie i działanie systemu. Z kolei „przewymiarowany” kontroler podraża niepotrzebnie jego koszty.
2. System operacyjny sterownika powinien być systemem czasu rzeczywistego. Wykluczone jest korzystanie z systemu Windows z uwagi na jego awaryjność i nieprzewidywalność działania menadżerów zadań i pamięci. Autorzy stosują do budowy systemów platformę komputerów przemysłowych PXI/RT (PCI eXtensions for Instrumentation / Real Time) produkcji National Instruments. Gama dostępnych w niej procesorów rozciąga się od niskobudżetowego Pentium 266MHz aż do Pentium M 760 2GHz.
3. Możliwość łatwego programowania w językach wysokiego poziomu. Łatwość programowania systemu przekłada się w prosty sposób zarówno na czas niezbędny do jego budowy jak i na późniejszą bezawaryjną pracę. Autorzy do tworzenia systemów wykorzystują język graficzny LabView firmy National Instruments zintegrowany ze stosowaną platformą sprzętową.
4. Odpowiednio wysoka częstotliwość próbkowania sygnałów dynamicznych (zazwyczaj 5-10kHz) i wyposażenie torów pomiarowych w filtry antyaliasingowe. Należy zwrócić uwagę na sposób działania przetworników analogowo cyfrowych a w szczególności sposób próbkowania. Spotyka się dwie wersje kart: multipleksowane, w których jeden przetwornik A/D obsługuje kolejno wszystkie kanały i tzw. Sample & Hold w których sygnał jest „zatrzaszkiwany” w tej samej chwili na wszystkich kanałach pomiarowych a następnie jest dokonywana jego konwersja liczbowa. Pierwszy rodzaj kart może uniemożliwić lub utrudnić analizę wzajemną kanałów pomiarowych z uwagi na ich przesunięcie w czasie, natomiast karty drugiego rodzaju, pozbawione tej wady, są znacząco droższe. W przypadku kart multipleksowanych

producenci zazwyczaj podają maksymalną częstotliwość próbkowania przetwornika A/D zatem największa częstotliwość próbkowania karty zależy od ilości wykorzystanych kanałów (im więcej tym mniejsza).

5. Możliwość współpracy z różnego typu przetwornikami pomiarowymi począwszy od przetworników w standardzie ICP i mostków tensometrycznych do pomiaru obciążenia, a na przetwornikach typowych dla układów automatyki przemysłowej (0-5mA, 4-20mA) i cyfrowych skończywszy. Korzystne jest stosowanie wymiennych modułów przetworników (kart pomiarowych), gdyż pozwala to na łatwą rozbudowę systemu lub ich wymianę w przypadku uszkodzenia.
6. Liczba wejść sygnałowych i sygnałów sterujących pracą maszyny dopasowana do diagnozowanej maszyny (zazwyczaj powyżej 10).
7. Odporność na warunki otoczenia, a w szczególności drgania i zarówno wysoką jak i niską temperaturę otoczenia.
8. Możliwość pracy w sieci TCP/IP co pozwala na integrację systemu w sieciowy e-system nadzoru maszyn całego zakładu (rys. 8) oraz pozwala na wymianę informacji z ekspertami zewnętrznymi.
9. Cały autonomiczny system diagnostyczny musi być wyposażony w zasilacz awaryjny (UPS) zintegrowany z oprogramowaniem systemu.



Rys. 8. Możliwość integracji autonomicznych układów diagnostycznych w e-system nadzoru maszyn

## 6. WNIOSKI

Celem pracy było przedstawienie warunków i procedur zbierania, przetwarzania i wykorzystania informacji diagnostycznej umożliwiających zmniejszenie ryzyka w systemie technicznym. Obecnie występujące systemy są coraz bardziej

rozbudowane i skomplikowane, magazynują i przetwarzają coraz większe ilości dóbr i energii. Występujące uszkodzenia mogą powodować coraz to większe skutki zarówno dla samych dóbr, środowiska oraz zdrowia i życia ludzi. Wynika stąd konieczność opracowania nowych zabezpieczeń i związanych z nimi nowych metod detekcji sygnałów. Zmienia się również organizacja systemów diagnostycznych i eksploatacyjnych, pojawia się zarządzanie utrzymaniem. Wszystkie te procesy są ze sobą ściśle powiązane i wpływają na podjęcie konkretnych decyzji.

Obecne systemy eksploatacyjne mają za zadanie przewidywanie stanu obiektu, problemów i odpowiednich reakcji w przyszłości. System taki jest bardzo rozbudowany, ma przed sobą wiele zadań, co wiąże się z dużymi kosztami. W celu usprawnienia systemów eksploatacyjnych dąży się do powstania tzw. autonomicznych struktur logistycznych. Struktura taka wymaga aby obiekt był na bieżąco poddawany diagnozie przez własny system diagnostyczny. Informacje te są przekazywane do bazy danych a po uwzględnieniu wymagań eksploatacyjnych i prognoz są podejmowane decyzje o potrzebie wykonania kolejnych pomiarów, ewentualnych naprawach, jednocześnie są wykonywane symulacje dalszego rozwoju uszkodzenia oraz jego skutków.

Bardzo ważne jest aby modele symulacyjne wiernie oddawały zachowanie systemu dlatego powinny uwzględniać informacje o aktualnym stanie obiektu.

W pracy przedstawiono również problemy występujące przy doborze właściwej platformy sprzętowo-programowej oraz założenia wykorzystania informacji diagnostycznej w zagadnieniu minimalizacji ryzyka technicznego

*Praca naukowa finansowana ze środków Komitetu Badań Naukowych w latach 2003-2005 jako projekt badawczy.*

## LITERATURA

- [1] Cronkhite J. D. Practical application of health and usage monitoring (HUMS) to helicopter rotor, engine and drive systems. AHS 49th Annual Forum, May 19-21, 1993 Str. Luis, MO, USA.
- [2] Stevens P. W., Hall D. L., Smith E. C. Multidisciplinary approach to rotorcraft health and usage monitoring. American Helicopter Society, 52nd Annual Forum, June 4-6, 1996, Washington, DC, USA.
- [3] Koç, M. and J. Lee, A System Framework for Next-Generation E-Maintenance System, EcoDesign, 2001, Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, Tokyo Big Sight, Tokyo, Japan, Dec. 11-15, 2001.
- [4] Kościelny J. M., Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych, Akademicka Oficyna Wydawnicza Exit, Warszawa 2000.
- [5] Mączak J.: The use of simulational models in autonomous diagnostic units, Diagnostyka Vol 30 /2, 2004, Proc. of 3<sup>rd</sup> International Congress of Technical Diagnostics DIAGNOSTICS '2004, Poznań, Sept. 6-9, 2004, str. 15-18.
- [6] Barszcz T.: Koncepcja monitorowania i diagnostyki maszyn wirujących małej i średniej mocy, Diagnostyka Vol.35, 2005, str. 49-56.
- [7] Żółtowski B., Cempel. C. i inn. Inżynieria Diagnostyki Maszyn, PTDT/ITE, Warszawa, Bydgoszcz, Radom 2004, str. 529-544
- [8] Gade S., Herlufsen H. i inn., Order Tracking Analysis, Bruel&Kjaer, Technical Review no 2, 1995.
- [9] Mączak J.: Wykorzystanie Zjawiska Modulacji Sygnału Wibroakustycznego w diagnozowaniu przekładni o zębach śrubowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 1998.



Dr inż. Jędrzej MĄCZAK jest adiunktem w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej. W pracy naukowej zajmuje się diagnostyką maszyn, modelowaniem matematycznym układów napędowych i metodami analizy sygnałów wibroakustycznych



Mgr inż. Arkadiusz ROSZCZEWSKI ukończył Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej na specjalności Fizyka Komputerowa. Interesuje się automatyką przemysłową i zagadnieniami sztucznej inteligencji. Obecnie zajmuje się zagadnieniami telewizji cyfrowej i automatyki przemysłowej.