

INFORMATYCZNE ASPEKTY PROJEKTOWANIA SYSTEMÓW MONITOROWANIA STANU MASZYN – SPRZĘT I OPROGRAMOWANIE

Tadeusz UHL*, Tomasz BARSZCZ*

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Robotyki i Dynamiki Maszyn
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: tuhl@rob.wibro.agh.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono podstawowe problemy projektowania i implementacji systemów monitorowania stanu maszyn. Szczególną uwagę zwrócono na problemy pomiarów, akwizycji i przetwarzania wyników pomiarów, algorytmów oceny stanu i implementacji systemów w standardach przemysłowych. Pokazano związki problemów projektowania systemów monitorowania z problemami projektowania systemów informatycznych. Przedstawiono kilka podstawowych rozwiązań stosowanych w systemach monitorowania, zarówno w zakresie sprzętu jak i oprogramowania. Zwrócono uwagę na możliwości wykorzystania nowoczesnych technik komunikacyjnych i satelitarnych dla celów realizacji systemów monitorowania.

Słowa kluczowe: akwizycja, monitorowanie stanu, system informatyczny, projektowanie systemów.

COMPUTER ENGINEERING PROBLEMS IN DESIGN AND IMPLEMENTATION OF MONITORING SYSTEM – HARDWARE AND SOFTWARE

Summary

The paper presents new trends in development of health monitoring systems. Problems with measurements, data acquisition and processing, new damage detection algorithms, and system implementation in industrial standards are discussed. Relations between design of computer systems and monitoring systems are shown. Paper is focused on vibroacoustics diagnostic systems and new solutions for damage detection based on model application.

1. WPROWADZENIE

Duże koszty eksploatacji wielu maszyn i urządzeń oraz wymagania ich użytkowników co do dyspozycyjności eksploatowanych instalacji zmuszają producentów do działań zmierzających do obniżenia kosztów eksploatacji jak również do podniesienia ich niezawodności i żywotności. Jednym z bardzo istotnych czynników wpływających na koszty eksploatacji to koszty remontów oraz koszty nieprzewidzianych przestojów awaryjnych. W wielu przypadkach, jak wykazują analizy efektywności eksploatacji metodami RCM [11], jedną z możliwości ich obniżenia jest monitorowanie i diagnozowanie stanu eksploatowanego obiektu, które ogranicza liczbę nieplanowanych przestojów związanych z awariami, umożliwia śledzenie stopnia zużycia obiektu oraz przewidywanie zakresu koniecznego remontu. Coraz częściej na odpowiedzialnych obiektach instalowane są systemy ciągłego monitorowania i diagnozowania stanu oraz zużycia. Przez system monitorowania stanu rozumie się wyposażenie techniczne i procedury obliczeniowe dla zbierania i analizy informacji związanej ze stanem i funkcjonowaniem poszczególnych części i podzespołów monitorowanego urządzenia w celu wykrycia początkowego stadium uszkodzenia lub zużycia, które mogą prowadzić do uszkodzenia. Przez proces diagnozowania rozumie się obecnie określenie bieżącego stanu technicznego, określenie przyczyn zaistnienia obecnego stanu, oraz określenia horyzontu czasowego przyszłej zmiany stanu

technicznego. Pierwsze i ostatnie zadanie diagnostyki realizuje się dla potrzeb eksploatacji natomiast określenie przyczyn zaistniałego stanu jest potrzebne dla producenta oraz służb remontowych. Realizacja tego procesu jest możliwa na podstawie danych najczęściej pochodzących z pomiarów. Pomiarów te są realizowane przez systemy monitorowania ciągłego bądź też za pomocą okresowych pomiarów wykonywanych przez operatora. Pomiarów realizowane w sposób ciągły na obiekcie w czasie jego eksploatacji, są obecnie preferowane ze względu na powszechność monitorowania zużycia (żywotności). W systemach tych poprzez pomiar pewnych wielkości towarzyszących eksploatacji dokonuje się oceny trwałości zmęczeniowej. Bardzo często w systemach tych istnieje bezpośrednia komunikacja pomiędzy systemami monitorowania oraz systemami sterowania co umożliwia uwzględnienie kryterium trwałości w realizacji sterowania [12]. Drugą przyczyną dla której coraz powszechniej stosuje się systemy ciągłego monitorowania jest fakt, że w diagnostyce do oceny aktualnego stanu bardzo przydatna jest informacja o jego zmianach, a nie tylko chwilowa wartość danego symptomu.

Diagnostykę w takim ujęciu można podzielić na dwa zasadnicze typy:

- diagnostyka eksploatacyjna,
- diagnostyka remontowa.

Do diagnozowania stanu urządzenia w diagnostyce eksploatacyjnej wykorzystywane są symptomy stanu związane zarówno ze zmiennymi procesowymi, jak również procesy resztkowe, które w sposób

nieodłączny towarzyszą eksploatacji każdej maszyny. Do procesów tych zalicza się procesy termiczne, elektryczne, a przede wszystkim wibroakustyczne. Umożliwiają one prowadzenie procesu diagnozowania bez wyłączania urządzenia z ruchu. W realizacji diagnostyki remontowej wykonuje się badania odchyłek wymiarów, własności materiałowych, degradacji materiałów (metalografie), itp. w stosunku do wzorca w postaci urządzenia bez defektu. Systemy monitorowania maszyn stosuje się do realizacji diagnostyki eksploatacyjnej.

W zakresie diagnostyki eksploatacyjnej można wyróżnić dwa sposoby wnioskowania diagnostycznego:

- oparte o symptomy diagnostyczne oraz wykorzystanie relacji symptom – stan
- oparte na modelu, wykorzystujące relacje stan – parametry modelu.

Do realizacji wnioskowania stosuje się coraz częściej systemy doradcze [22] umożliwiające w sposób automatyczny lub poprzez realizację wspomaganą decyzji operatora na diagnozowanie wielu obiektów. Do realizacji tego typu systemów konieczne jest posiadanie zidentyfikowanych relacji diagnostycznych będących podstawą określania reguł oraz tworzących bazy wiedzy diagnostycznej. Relacje te mogą być identyfikowane za pomocą eksperymentu biernego, eksperymentu czynnego, symulacji odpowiednich modeli oraz poprzez zastosowanie modelu odwrotnego [23]. Idea diagnozowania poprzez model polega na śledzeniu zmian parametrów modelu w czasie eksploatacji. Wymaga to prowadzenia na bieżąco wraz z przebiegiem procesu identyfikacji parametrów modelu. Pozwala to na określeniu uszkodzenia, miejsca jego wystąpienia oraz stan zaawansowania. W ostatnim okresie nastąpił duży postęp w zakresie zastosowania modeli w diagnostyce ze względu na opracowanie metod identyfikacji modeli na podstawie pomiarów eksploatacyjnych realizowanych w czasie normalnej pracy urządzenia [4,7]. Do tego typu metod należy metoda eksploatacyjnej analizy modalnej [2], coraz powszechniej stosowana w praktyce przemysłowej, metody oparte o modele regresyjne obiektów [20], metody realizowane dla opisu obiektów w przestrzeni stanów [18,19], metody wykorzystujące modele w postaci sztucznych sieci neuronowych [13]. W diagnostyce eksploatacyjnej wyróżnia się dwa typy decyzji diagnostycznych;

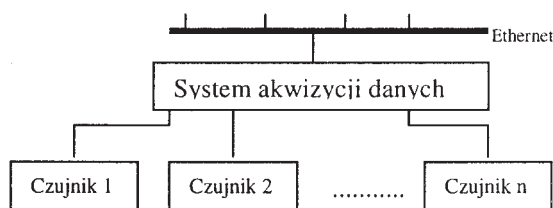
- decyzje istotne dla użytkownika; czy obiekt pracuje poprawnie, jaka jest prognoza poprawnej pracy,
- decyzja ważna dla obsługującego obiekt; lokalizacja uszkodzenia, określenie przyczyny uszkodzenia, dane konieczne do określenia zakresu koniecznej naprawy.

Rozwój systemów monitorowania i diagnozowania konstrukcji wiąże się ściśle z rozwojem technik

informatycznych. W chwili obecnej tendencje w rozwoju systemów monitorowania i diagnozowania idą w kierunku systemów rozproszonych, systemów opartych na inteligentnych czujnikach, systemów wyposażonych w wiele możliwości komunikacji z operatorem i innymi systemami wspomaganiami eksploatacji. Systemy te cechuje modułowość, standaryzacja zarówno oprogramowania jak i sprzętu, jak również sieciowość oznaczająca łatwość komunikacji i integracji takiego systemu z innymi systemami. Bardzo szybko w chwili obecnej rozwijają się systemy monitorowania zużycia w szczególności dotyczy to odpowiedzialnych i niebezpiecznych dla ludzi i środowiska instalacji.

2. ROZWIĄZANIA SPRZĘTOWE W SYSTEMACH MONITOROWANIA I DIAGNOZOWANIA STANU MASZYN

Jednym z podstawowych elementów sprzętowych systemów monitorowania są czujniki zbierające informacje o aktualnym stanie mierzonego procesu. Obecnie najczęściej wykorzystywane czujniki można zaliczyć do klasy czujników inteligentnych z których wyjście jest cyfrowe, a na ich wyjściu jest informacja wstępnie przetworzona. Takie rozwiązanie z jednej strony zmniejsza ilość danych przesyłanych do systemu akwizycji, z drugiej natomiast ogranicza elastyczność systemu rozumiana jako możliwość realizacji innych funkcji czy innych sposobów realizacji przetwarzania. Schemat układu monitorowania z inteligentnymi czujnikami przedstawiono na rysunku 1. Innym rozwiązaniem które umożliwia realizację układów monitorowania w sposób etapowy oraz ma strukturę modułową jest układ złożony z czujnika, lokalnego układu monitorowania oraz systemu w postaci stacji roboczej, której zadaniem jest zarządzanie działaniem całego systemu monitorowania.

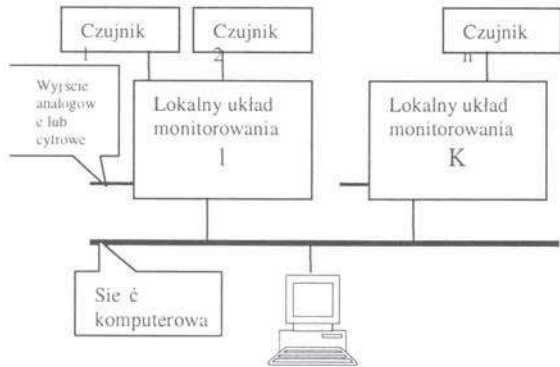


Rys. 1. Schemat układu z inteligentnymi czujnikami.

Schematycznie strukturę takiego układu przedstawiono na rysunku 2. Lokalny układ monitorowania może pracować niezależnie od stacji roboczej realizując podstawowe funkcje monitorowania i diagnostyki, a w szczególności umożliwia wykrycie uszkodzenia. W typowych rozwiązaniach z tego zakresu lokalny układ monitorowania zawiera;

- podukład kondycjonowania sygnałów,
- podukład wstępnego przetwarzania sygnałów,
- podukład rejestracji sygnału,

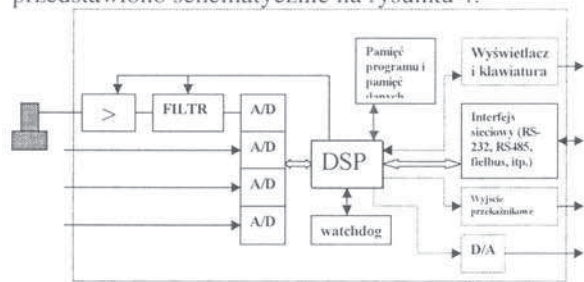
- podukład generowania alarmów
- podukład komunikacji



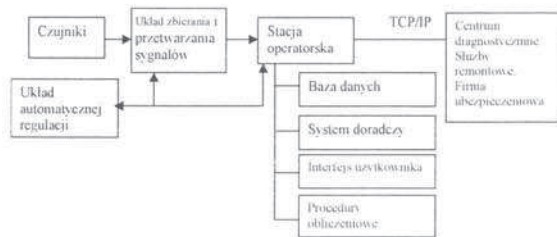
Rys.2. Schemat układu monitorowania z lokalnym układem zbierania i rejestracji danych

Podstawowym zadaniem lokalnego układu monitorowania jest zasilanie czujnika, wstępne przetwarzanie sygnału, wyznaczenie estymatora wymaganego dla oceny stanu oraz rejestracja w pamięci danych w czasie realizacji pomiarów. W wielu rozwiązaniach układ posiada możliwość programowania wartości dopuszczalnych, wizualizację przekroczenia tych stanów oraz generowania i wysyłania sygnałów cyfrowych bądź analogowych o przekroczeniu przez wielkość mierzoną lub wyznaczony estymator wartości dopuszczalnych. Sygnał ten może być włączony w układ zabezpieczeń monitorowanej maszyny. Zarejestrowane wielkości mogą być czytane, najczęściej poprzez złącze szeregowo do komputera w celu dokonania analizy trendów. Analiza trendów jest podstawowym i najprostszym narzędziem diagnostycznym stosowanym w praktycznych rozwiązaniach układów monitorowania w systemach diagnostyki wibroakustycznej. Dla jej realizacji w lokalnym układzie monitorowania konieczna jest rejestracja sygnałów. Z punktu widzenia konstrukcji sprzętu architektura lokalnego układu monitorowania jest modułowa, a poszczególne kanały wejściowe z czujników są obsługiwane poprzez odpowiednie nakładki. Na bazie lokalnych układów monitorowania można budować duże rozproszone układy monitorowania, a ilość możliwych do włączenia lokalnych modułów zależy od zastosowanych standardów złącza komunikacyjnego. Wiele z dostępnych na rynku układów posiada wbudowane wyjście analogowe dla celów realizacji specjalistycznych analiz sygnału w chwili wykrycia uszkodzenia. Analiza te ułatwiają określenie przyczyny wystąpienia uszkodzenia. Bardziej zaawansowane systemy zawierają procesor sygnałowy umożliwiającą realizację złożonych analiz sygnałów. Schemat tak rozbudowanego lokalnego układu monitorowania przedstawiono na rysunku 3. Najbardziej rozbudowane sprzętowo są zintegrowane układy ciągłego monitorowania

obiektów. Podstawowe funkcje tych układów przedstawiono schematycznie na rysunku 4.

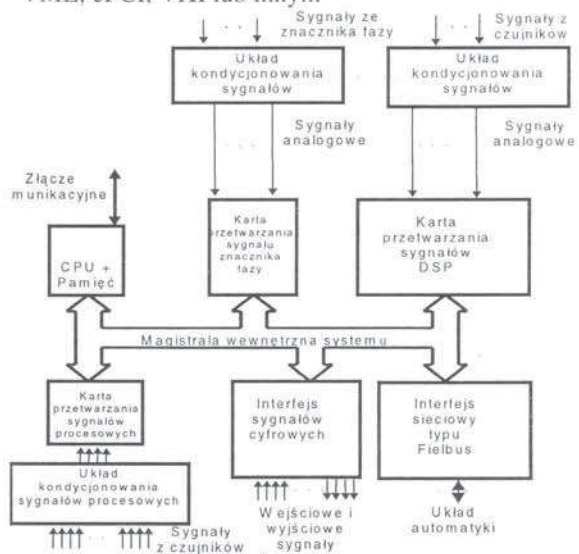


Rys.3. Schemat układu monitorowania z zastosowaniem procesora sygnałowego



Rys.4. Podstawowe funkcje zintegrowanego układu sterowania

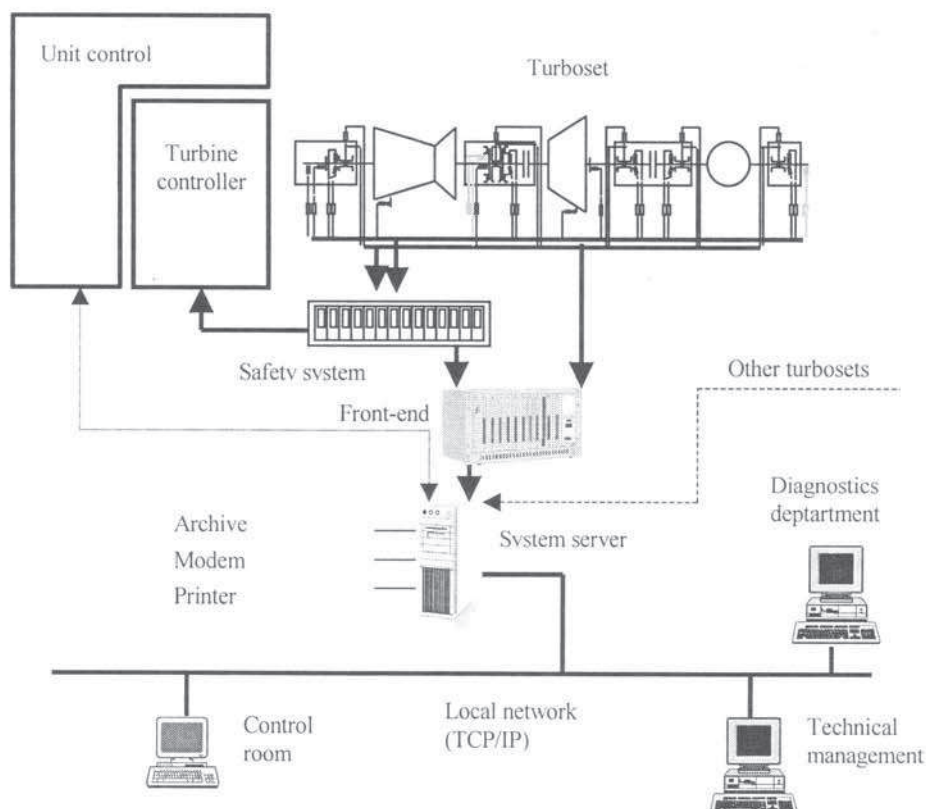
Istotną cechą tego typu układu jest rozdzielenie funkcji zbierania i przetwarzania danych od funkcji tworzenia baz danych oraz podejmowania decyzji diagnostycznych. Takie podejście determinuje architekturę sprzętową systemu, która ma w większości tego typu układów monitorowania postać „front end – stacja robocza”. Są to połączone pomiędzy sobą dwa komputery o typowych dla siebie funkcjach. Komputer będący interfejsem pomiarowym ma za zadanie realizację pomiarów, przetwarzanie wyników pomiarów oraz wysyłanie wyników do stacji roboczej, w której realizowane są dalsze analizy. Komputer ten w większości współcześnie stosowanych rozwiązań stanowi komputer czasu rzeczywistego oparty na przemysłowej magistrali VME, cPCI, VXI lub innym



Rys.5. Schemat architektury typowej stacji pomiarowej stosowanej w diagnostyce maszyn wirnikowych.

Natomiast stacja robocza jest komputerem klasy PC lub stacją roboczą realizującą zadania archiwizacji danych, przetwarzania wyników, wnioskowania diagnostycznego, a przede wszystkim serwera w sieci w której umieszczony jest system monitorowania. Złącze pomiędzy stacją pomiarową, a stacją roboczą jest najczęściej klasyczna sieć komputerowa przemysłowa. Schemat najczęściej stosowanej stacji pomiarowej przedstawiono na rysunku 5.

Przedstawiona architektura ma strukturę modułową co umożliwia dopasowanie wielkości systemu monitorowania do potrzeb użytkownika i rodzaju monitorowanego obiektu. Bardzo istotnym elementem doboru systemu monitorowania do obiektu są analizy ekonomiczne z uwzględnieniem polityki remontowej firmy. Jedną z metod jakie można zastosować do tego celu jest metoda RCM (ang. Reliability Centered Maintenance) uwzględniająca również ocenę ryzyka nieprzewidzianej awarii monitorowanej instalacji[11]. Przykład zrealizowanego w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn AGH we współpracy z ALSTOM Power układu monitorowania przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Przykładowa realizacja układu monitorowania bloku energetycznego (AIDA951)

Jednym z wymagań stawianych współcześnie eksploatowanym systemom monitorowania i diagnostyki jest możliwość zdalnego otrzymywania informacji o stanie obiektu jak również zdalnego sterowania systemem monitorowania. W chwili

obecnej, przy dostępnych systemach komunikacji jest możliwa realizacja tych wymagań. Jednym ze sposobów jest włączenie serwera systemu monitorowania w sieć Internet i udostępnienie informacji zgromadzonych w bazie danych dla upoważnionych użytkowników. Takie rozwiązanie zastosowano w kilku znanych autorowi systemach [8,26]. Inne rozwiązanie umożliwia wysyłanie informacji do wybranych użytkowników poprzez SMS (ang. Short Message Service) w sieci telefonii komórkowej GSM (ang. Global System for Mobile communications). Serwis SMS umożliwia realizację przesyłania krótkich informacji z lub do telefonu komórkowego o długości 160 znaków, jest to wystarczająca ilość aby przesłać do użytkownika informacje o aktualnym stanie lub o stanach alarmowych dotyczących monitorowanej konstrukcji. Warunkiem realizacji takiej transmisji informacji jest dostępność sieci GSM w miejscu przebywania odbiorcy. Istnieje kilka możliwości realizacji takiej komunikacji od strony systemu monitorowania. W Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn przetestowano trzy możliwości:

- wysyłanie SMS poprzez bramkę WEB,
 - wysyłanie SMS poprzez e-mail
 - wysyłanie SMS z zastosowaniem terminala GSM.
- Dwa pierwsze rozwiązania wymagają dostępności

sieci telefonicznej lub Internetu w miejscu zainstalowania systemu monitorowania. W przypadku spełnienia warunku dostępności do Internetu, jak wykazały przeprowadzone w Katedrze badania sposób poprzez wysyłanie SMS z wykorzystaniem e-maila jest najtańszy, ale czas otrzymania informacji adresata jest niezdeterminowany i zależy od obciążenia sieci. Najlepszy i najszybszy sposób realizacji przesyłania

informacji z systemu monitorowania do odbiorcy jest wykorzystanie terminala GSM. Terminal taki może być połączony z systemem monitorowania poprzez złącze typu RS232 i może pracować jako modem. Informacja może być tutaj przesyłana w obie strony tak że użytkownik ma możliwość sterowania pracą systemu. Rozwiązanie to jest w pełni niezależne od ruchu w sieci Internet. Terminale GSM można w prosty sposób programować z zastosowaniem komend AT. Dużo większe możliwości przesyłania informacji diagnostycznych z systemu monitorowania stworzone zostaną w chwili uruchomienia sieci telefonii komórkowej opartej na standardzie UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) nazywany również 3G. Jest on dedykowany do przesyłania pakietów tekstowych, przetworzonego do postaci cyfrowej głosu i obrazu z szybkością większą jak 2megabity na sekundę. Zaleta systemu będzie też możliwość uzyskiwania połączeń przez satelity. Z chwilą rozpoczęcia pracy tego systemu dla celów diagnostycznych stworzone zostaną możliwości interakcji użytkownika z systemem oraz podgląd danych z systemu przez użytkownika w sposób graficzny. Dzisiejsze rozwiązania oparte o GSM mają możliwość jedynie transmisji i podglądu ograniczonej ilości danych alfanumerycznych.

W przypadku monitorowania obiektów dużych z zastosowaniem metod wibroakustycznych istnieje konieczność synchronizacji pomiarów drgań realizowanych w dużych odległościach od siebie. Taka sytuacja ma miejsce w systemach monitorowania mostów. Synchronizacja takich pomiarów może być zrealizowana poprzez połączenie stacji pomiarowych kablem lub też wykorzystując sygnał synchronizacji wysyłany przez system GPS. Pierwsze z rozwiązań jest bardzo drogie i uciążliwe do realizacji ze względu na konieczność ułożenia kabla, dlatego też wykorzystuje się coraz częściej rozwiązanie oparte na odbiorze sygnału GPS. System GPS składa się z trzech podstawowych segmentów;

- segmentu kontroli,
- segmentu kosmicznego
- segmentu użytkownika.

Naziemny segment kontroli spełnia rolę nadzorującą i składa się z pięciu stacji nadzorujących rozmieszczonych na całym świecie. Prowadzą one ciągły nasłuch sygnałów z satelitów, sprawdzają poprawność działania satelitów i komunikują się za stacją główną. Stacja centralna oblicza parametry orbit satelitów, wyznacza poprawki zegarów satelitów i przekazuje do satelitów wyznaczone poprawki. Segment użytkownika składa się z odbiorników GPS. Odbiorniki te przekształcają sygnał pochodzący od satelity na położenie, prędkość i czas. Potrzebne są sygnały z minimum czterech satelitów aby obliczyć położenie i czas. Podstawowym zastosowaniem GPS jest nawigacja w trzech wymiarach, innymi zastosowaniami jest określenie dokładnego czasu oraz synchronizacja

czasowa w rozproszonych systemach sterowania i monitorowania. Dokładność w zakresie pomiaru czasu systemu GPS dla usług typu PPS (Precise Positioning Service) dostępnych dla autoryzowanych użytkowników jest 200 nanosekund, natomiast dla usług typu SPS (Standard Positioning Service) 340 nanosekund. Jest to dokładność w zupełności wystarczająca dla systemów monitorowania opartych na pomiarach wibroakustycznych. Aby wykorzystać sygnał GPS w systemach monitorowania należy wyposażyć go w odpowiedni odbiornik. Odbiornik GPS jest wyposażony w złącze typu NMEA0183, który jest podobny do RS232 tylko posiada inne sygnały elektryczne. Opisane wyżej rozwiązania sprzętowe dostarczają informacji pomiarowej o obiekcie, która musi zostać odpowiednio przetworzona dla celów wnioskowania diagnostycznego. Stosuje się wiele różnych algorytmów monitorowania i diagnozowania, krótki ich przegląd przedstawiono w następnym punkcie pracy.

3. ROZWIĄZANIA ALGORYTMÓW MONITOROWANIA I DIAGNOZOWANIA STANU MASZYN

Z punktu widzenia stosowanych algorytmów w systemach monitorowania i diagnozowania można wyróżnić dwa typy układów[24]:

- oparty na symptomach stanu,
- oparty na modelu.

Zadania jakie realizowane są w sposób algorytmiczny można podzielić na kilka grup:

- akwizycja i analiza sygnałów,
- archiwizacja danych,
- analiza danych pod kątem wykrywania uszkodzenia,
- analiza danych pod kątem lokalizacji uszkodzenia,
- analiza danych pod kątem predykcji stanu,
- wspomaganie decyzji diagnostycznych oraz klasyfikacja stanu,
- redundancja analityczna kanałów pomiarowych,
- zadania komunikacji i koordynacji pracy urządzenia.

Jedną z możliwych realizacji algorytmów diagnozowania jest generowanie reszt z modeli z zastosowaniem modeli opartych o sieci neuronowe [13]. Inną coraz częściej wykorzystywaną w praktyce możliwością jest zastosowanie metod podprzestrzeni stanów [18].

Metody te na podstawie pomiarów przebiegów czasowych drgań obiektu w wielu jego punktach umożliwiają śledzenie na bieżąco zmian w wartościach parametrów modelu, a przede wszystkim zmian parametrów modelu modalnego. Znane są autorom implementacje tych algorytmów w systemach monitorowania samolotów, satelitów oraz maszyn wirnikowych [19,21]. Nowe możliwości w realizacji diagnozowania konstrukcji mechanicznych on-line stworzyła metoda analizy modalnej oparta na pomiarach tylko odpowiedzi. Metoda ta została opracowana przy współdziałaniu autorów publikacji

w ramach projektu europejskiego SINOPSYS [21,9]. Jak widać z tego zestawienia algorytmów do ich realizacji konieczne jest zawansowane oprogramowanie.

4. ROZWIĄZANIE PROGRAMOWE W SYSTEMACH DIAGNOZOWANIA I MONITOROWANIA STANU MASZYN

Oprogramowanie jest niezbędnym elementem systemów monitorowania i diagnozowania. Celem oprogramowania jest gromadzenie danych i taka ich prezentacja, aby z bardzo dużej ilości mierzonych danych uzyskać użyteczną informację, na podstawie której można wnioskować o stanie maszyny. Powoduje to, że oprogramowanie realizuje następujące funkcje:

- konfiguracja systemu
- pobieranie danych (akwizycja)
- filtracja
- przetwarzanie danych
- sygnalizacja przekroczeń i innych zdarzeń w systemie
- przechowywanie danych
- prezentacja danych

Przedstawione funkcje mogą być różnie realizowane w różnych systemach monitorowania. Systemy takie można podzielić na trzy podstawowe kategorie: systemy złożone z niepołączonych ze sobą (autonomicznych) zbieraczy danych (ang. *data logger*), systemy monitoringu ciągłego rejestrującego wielkości wolnozmiennie (do kilku Hz na kanał) oraz systemy monitorujące sygnały dynamiczne, próbkujące sygnały z częstotliwościami powyżej 100 Hz na kanał. Poniżej przedstawione zostaną cechy charakteryzujące poszczególne klasy oprogramowania.

4.1. Autonomiczne zbieracze danych

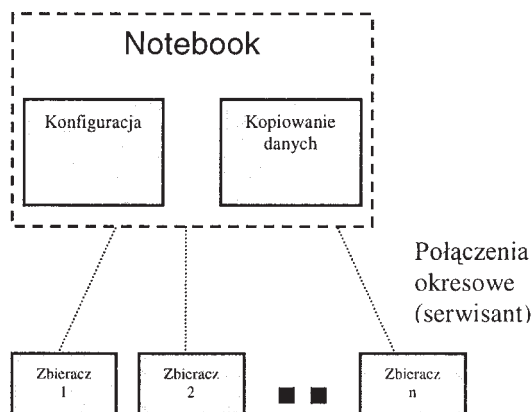
System złożony z rozproszonych zbieraczy danych opisany został w rozdziale X. Podstawowe oprogramowanie tego typu urządzeń jest dostarczane razem ze zbieraczem. Jego zadania to:

- konfiguracja systemu
- pobieranie danych

Oprogramowanie takie jest typowym oprogramowaniem narzędziowym, realizującym jedynie podstawowe funkcje. Po zainstalowaniu zbieracza jest on konfigurowany programowo, przez dołączenie go portem szeregowym do notebook'a z oprogramowaniem konfiguracyjnym. Ustawiane są podstawowe parametry pracy, takie jak: parametry portu komunikacyjnego, zakresy kanałów, poziomy progów alarmowych, okresy rejestracji danych itp.. Po zakończeniu konfiguracji wprowadzone parametry zapisywane są w pamięci nieulotnej. Zbieracz danych pracuje autonomicznie, sygnalizując przekroczenia alarmów i okresowo rejestrując dane w pamięci.

Użytkownik wyposażony w notebook okresowo łączy się z każdym zbieraczem i kopiuje dane w pamięci zbieracza do bazy danych. W najprostszej wersji funkcjonalność ta ograniczona jest do skopiowania danych z pamięci zbieracza do pliku tekstowego, który następnie jest obrabiany standardowymi narzędziami, np. MS Excel. W taki sposób realizowana jest podstawowa funkcja diagnostyki, tj. analiza trendów.

Rysunek 7 przedstawia strukturę oprogramowania podstawowego systemu opartego o autonomiczne zbieracze danych.



Rys. 7. Struktura oprogramowania podstawowego systemu opartego o autonomiczne zbieracze danych.

Bardziej rozbudowane programy analizy danych są wyposażone we własne narzędzia analizy danych, takie jak serwer bazy danych, wykresy trendów, moduły prognozowania czasu od momentu osiągnięcia stanu alarmowego itp.. Posiadają one funkcjonalność bardzo zbliżoną do systemów opisanych w p. 4.2. Opisy takich systemów znaleźć można np. w [1], [2].

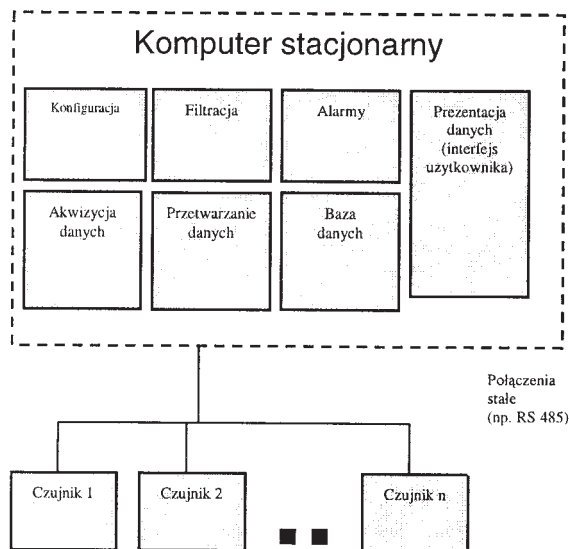
4.2. Systemy monitorowania wielkości wolnozmiennych

Wielkości wolnozmiennie charakteryzują się częstotliwością pomiaru poniżej kilku Hz, najczęściej granicą przyjmowaną w systemach monitorowania jest 1 Hz. Systemy stacjonarne, które przetwarzają takie sygnały, są na stałe podłączone do czujników, bądź przez karty we/wy, bądź do czujników „inteligentnych”, wyposażonych w interfejsy szeregowy, najczęściej RS 485. Systemy takie realizują praktycznie wszystkie funkcje wymienione na początku niniejszego rozdziału. Zakres ich realizacji zależy od konkretnego systemu. Filtracja np. stosowana jest w przypadku pomiaru danych, które są danymi wejściowymi do obliczeń sprawności układów przepływowych. Z uwagi na dużą niestacjonarność obiektu dane wejściowe muszą zostać silnie przefiltrowane, aby uzyskać wiarygodne wartości wejściowe. Filtracja jest również niezbędna, gdy z danych określany jest np. gradient mierzonych wartości.

Rysunek 8 przedstawia strukturę oprogramowania stacjonarnego systemu monitorowania wielkości wolnozmiennych.

Systemy takie są dość podobne do systemów SCADA (ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*) [3], [4], które są obecnie standardem stosowanym do monitorowania i sterowania obiektami przemysłowymi. Różnice pomiędzy systemami monitorowania i diagnostyki w porównaniu z systemami SCADA to:

- brak sprzężenia zwrotnego
- większe ilości gromadzonych danych
- bardziej zaawansowane funkcje replikacji bazy danych
- dodatkowe funkcje diagnostyczne



Rys. 8. Struktura oprogramowania stacjonarnego systemu monitorowania wielkości wolnozmiennych.

Systemy typu SCADA mogą być stosowane tylko do najprostszych funkcji monitorowania.

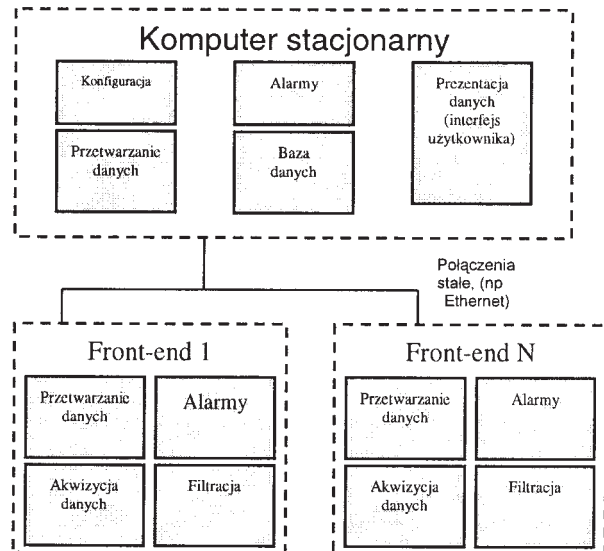
4.3. Systemy monitorowania wielkości dynamicznych.

Stacjonarne systemy monitorowania i diagnostyki wielkości dynamicznych charakteryzują się przede wszystkim dużą ilością przetwarzanych danych, wynikającą głównie z wysokiej częstotliwości próbkowania sygnałów wejściowych. Typowym przykładem tej grupy systemów są systemy wibrodiagnostyczne, w których częstotliwości próbkowania sięgają 20 kHz. Szersze omówienie takich systemów znaleźć można np. w [5], [6], [7]. Dane transmitowane są w tego typu systemach z prędkościami przekraczającymi 100 KB/s, co uniemożliwia stosowanie typowych przetworników „inteligentnych” i łączy szeregowych opartych na RS-485. Dane są pobierane przez specjalizowane moduły „front-end”, na których działa oprogramowanie czasu rzeczywistego. Oprócz pobierania danych często realizowane są też funkcje filtracji, wstępnego przetwarzania i wykrywania alarmów. Pozwala to na odciążenie komputera

centralnego i zmniejsza ilości transmitowanych danych.

Transmisja danych odbywa się przez łącza sieciowe, które zapewniają dużo większą przepustowość (10 – 100 Mbitów/s).

Rysunek 9 przedstawia strukturę oprogramowania stacjonarnego systemu monitorowania wielkości dynamicznych.



Rys. 9. Struktura oprogramowania stacjonarnego systemu monitorowania wielkości dynamicznych.

Najistotniejszą cechą oprogramowania tego typu systemów jest rozproszenie poszczególnych części oprogramowania pomiędzy poszczególne komputery systemu. Istotny jest również fakt, że niektóre części, takie jak przetwarzanie danych i wykrywanie alarmów są realizowane na kilku komputerach. Podejście to jest korzystne, jeżeli jednocześnie należy wykonywać stosunkowo proste analizy, wymagające jednak dużej mocy obliczeniowej (np. FFT, analiza synchroniczna) i bardziej skomplikowane, wykonywane stosunkowo rzadko (np. zaawansowane analizy trendów).

4.4. Systemy operacyjne w systemach monitorowania

Problem wyboru systemu operacyjnego, pod którego kontrolą ma działać system monitorowania i diagnostyki ma kluczowe znaczenie dla jego działania, a szczególnie dla akwizycji danych. Najważniejszym wymaganiem wobec modułu akwizycji danych jest zapewnienie zapisu wszystkich wymaganych danych, niezależnie od chwilowego obciążenia systemu. Typowym przypadkiem jest zapewnienie działania akwizycji przy jednoczesnym przeglądaniu danych, drukowaniu lub innych operacjach, które mogą znacznie obciążać procesor. Typowym rozwiązaniem takich problemów jest zastosowanie systemów operacyjnych czasu rzeczywistego (ang. *real-time operating system*, RTOS). Omówienie problematyki RTOS zawarte jest

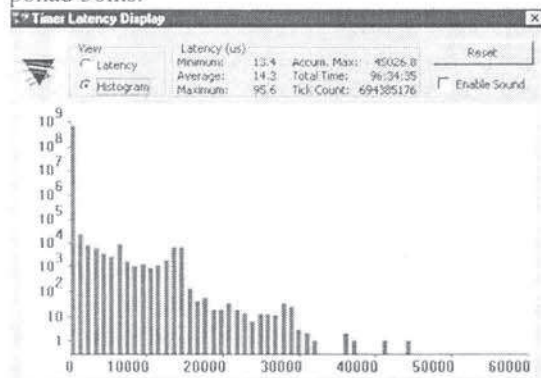
np. w [8]. Informacje na temat przykładowych RTOS można znaleźć w [9], [10].

Najistotniejszą właściwością systemu czasu rzeczywistego jest jego zdolność do odpowiedzi z określonym czasie. Parametrami mierzonymi są czas przełączania kontekstu i czas opóźnienia obsługi przerwania. W przypadku, gdy czasy te są rzędu mikrosekund niezbędne jest zastosowanie systemu operacyjnego tzw. twardego czasu rzeczywistego (ang. *hard real-time*). Są one również niezbędne w zastosowaniach w zadaniach sterowania. Jeżeli czasy charakteryzujące system są zbliżone do milisekund, mówimy o systemach tzw. miękkiego czasu rzeczywistego (ang. *soft real-time*). Są to wymagania wystarczające w większości systemów diagnostycznych.

W warunkach, gdy można dopuścić aby dane były zapisywane z opóźnieniem (przy zachowaniu wymagania co do akwizycji wszystkich danych), często stosowanym rozwiązaniem jest zastosowanie kart akwizycji danych wyposażonych w bufor (tzw. kolejki FIFO). Oprogramowanie odczytuje dane z bufora rzadziej niż są one zapisywane, a maksymalny okres zapisu zależy od pojemności bufora. Metoda ta jest często stosowana w prostszych rozwiązaniach systemów monitorowania, ponieważ nie wymaga ona stosowania systemu operacyjnego czasu rzeczywistego i jest prostsza i tańsza.

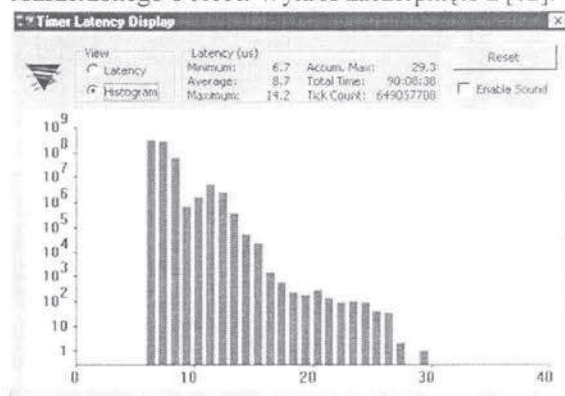
Z uwagi na dominację systemu Windows NT (i zastępującego go Windows 2000) w zastosowaniach przemysłowych, dąży się również do stosowania go w systemach monitorowania. Rozwiązania przyjęte w systemie Windows NT nie zapewniają jednak spełnienia wymagań czasu rzeczywistego [11] [12], głównie w zakresie obsługi przerwania. Na rysunku 10 przedstawiono wyniki pomiarów wydajności systemu Windows NT 4.0. Wykres zaczerpnięto z [12].

Z zamieszczonego wykresu wynika, że jądro systemu NT optymalizuje średni czas odpowiedzi systemu, co jest podejściem typowym do systemów biurowych. Nie jest to jednak podejście akceptowalne dla systemów czasu rzeczywistego, ponieważ nie gwarantuje maksymalnego czasu odpowiedzi. Na wykresie widoczne są opóźnienia ponad 30ms.



Rys. 10. Wyniki pomiarów wydajności systemu Windows NT

W wyniku tego ograniczenia NT jest stosowany do systemów, w których karty pomiarowe są wyposażone w bufor FIFO, a także w wielu systemach, które wymagają czasu odpowiedzi systemu rzędu 1s. Przykład takiego systemu można znaleźć w [13]. Jeżeli system ma również wykonywać w sposób deterministyczny zaawansowane funkcje akwizycji i przetwarzania danych, systemy czasu rzeczywistego stosowane są w komputerach front-end, które współpracują z serwerami pracującymi w systemie Windows NT. Przykład takiego systemu, stosującego we front-end'zie system VxWorks, przedstawiono w [14]. Obiecujący kierunkiem jest także wymiana niektórych komponentów systemu Windows NT, tak aby uzyskać system czasu rzeczywistego. Podejście takie stosowane jest np. w systemie RTX [12]. Po uzupełnieniu systemu Windows NT o RTX maksymalny czas odpowiedzi systemu skraca się do 30us. Poniższy wykres (rys.11) przedstawia wyniki pomiarów wydajności systemu Windows NT rozszerzonego o RTX. Wykres zaczerpnięto z [12].



Rys. 11. Wyniki pomiarów wydajności NT + RTX

4.5. Bazy danych w systemach monitorowania

Baza danych jest najistotniejszym modułem systemu monitorowania, a sposób jej realizacji ma decydujący wpływ na działanie systemu. Wpływ ten jest tym większy, im większy jest strumień zapisywanych danych i wymagania użytkownika systemu co do uniwersalności funkcji bazy danych.

Jeszcze kilka lat temu wszystkie systemy wyposażane były w specjalizowane bazy, tworzone na potrzeby każdego projektu. Rozwiązanie takie było z reguły kosztowne, zarówno w tworzeniu, jak i w pielęgnacji, a powstałe bazy danych oferowały tylko podstawową funkcjonalność.

W wyniku rozwoju technologii baz danych, znacznie rozwinęły się bazy danych standardu SQL (ang. *Structured Query Language*). Szersze informacje na temat baz danych SQL znaleźć można np. w [15]. Korzyści, jakie oferują bazy SQL, to:

- unifikowany interfejs do zarządzania bazą
- unifikowany interfejs do zapisu i odczytu danych
- standardowe narzędzia replikacji danych (również zdalnej)

- możliwość niezależnego dostępu do danych przez użytkownika

Ograniczeniem baz danych SQL jest ich stosunkowo niska przepustowość (rozumiana jako maksymalny strumień danych możliwy do zapisania przez bazę). Z tego względu są one stosowane jedynie do systemów monitorowania sygnałów wolnozmiennych. W przypadku konieczności zapisu dużo większych ilości danych, co występuje w systemach monitorowania sygnałów dynamicznych, bazy SQL nie zapewniają wystarczającej przepustowości. W takich przypadkach stosowane są trzy metody: specjalizowana baza danych, (zalety i wady opisano powyżej), połączenie bazy SQL i bazy specjalizowanej (baza SQL przechowuje np. tylko nazwy plików na dysku, w których przechowywane są dane dynamiczne), bądź równoległe stosowanie dwóch baz: dedykowanej bazy do danych dynamicznych i bazy SQL dla danych wolnozmiennych i estymat danych dynamicznych.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Jak przedstawiono w pracy, w chwili obecnej problemy projektowania i implementacji systemów monitorowania są najczęściej problemami informatycznymi. Rozwój informatyki stwarza coraz to nowe możliwości, dla budowania systemów monitorowania poprzez stworzenie bazy dla realizacji coraz bardziej złożonych algorytmów, integracji rozproszonych systemów oraz tworzenia dużych baz danych i analizy zawartych w nich informacji. Już w obecnie wydaje się realne zdalne prowadzenie monitoringu i diagnostyki bez względu gdzie znajduje się obiekt, a gdzie jest w danej chwili diagnosta. Dlatego też stworzone są już podstawy techniczne do budowy wirtualnych centrów diagnostyki, które działają dla użytkowników obiektów technicznych, a nie są bezpośrednio z nimi związane.

6. LITERATURA

[1] T. Uhl, Stan obecny i trendy rozwojowe w systemach monitorowania i diagnozowania stanu maszyn, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 1999, no.4, s. 12-17.

[2] T. Uhl, Zastosowanie Analizy Modalnej w Diagnostyce, *Diagnostyka*, vol.10, 2000, s. 24-32.

[3] T.Uhl, T. Barszcz, L. Miekina, The Role of Software in monitoring systems, *International Congress on Diagnostics*, Warszawa, September, 2000.

[4] T.Uhl, W. Batko, Wybrane problemy diagnostyki maszyn, *CCATIE No.5*, Kraków, 1997.

[5] Barszcz T. Uhl T., Rumak T, Selected applications of modern diagnostics in Alstom Power, *II International Congress of Technical Diagnostics*, Warszawa, 2000.

[6] Lisowski W., Uhl T., Application of operational modal analysis to diagnostic of big fans, *II International Congress of Technical Diagnostics*, Warszawa, 2000

[7] Uhl T., W. Batko Application of Models in Diagnostics, *VETOMAC*, Bangalore, October 2000.

[8] Barszcz T., Uhl. T.- AIDA –Turbojets monitoring and diagnostics system, *Mat. konf. ICCO'2000 Podbanske Slovak Republica*, maj 2000, str. 59-62

[9] Lisowski W., Uhl T.-Application of Operational Model Analysis to Diagnostics- case study, *Materiały konferencyjne, Proceedings of ISMA25*, 2000 International Conference on Noise and Vibration Engineering, vol II, wrzesień 2000, str. 733- 740

[10] Barszcz T., Uhl. T., Bogacz M., Hanc.-Results of application of DSP in vibrodiagnostics systems, *Materiały konferencyjne, II Międzynarodowa Kongres Diagnostyki Technicznej Diagnostyka 2000*, Warszaw, wrzesień 2000.

[11] Pietrzyk A., Uhl T., Piskorz Z., Projektowanie układów monitorowania stanu maszyn z zastosowaniem techniki RCM, *Kongres Eksploatacji Maszyn*, Krynica, 2001.

[12] Uhl T., Miękina L., Jabłoński J., Wyszynski J, *Diagnostyka Kotłowych Urządzeń energetycznych, IV Konferencja Metod Doświadczalnych*, Wrocław, 1999

[13] Korbicz J., Sztuczne sieci neuronowe i ich zastosowanie w diagnostyce procesów przemysłowych, *PAK*, no.4, 1998.

[14] Gibiec M., Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych w diagnostyce maszyn,

[15] Gibiec M, Zastosowanie zbiorów rozmytych w diagnostyce maszyn,

[16] Kapla, Elliot D., *Understanding GPS: Principles and applications*, Artech Publishers House, Boston, 1996.

[17] „Can NT 4 be used as an RTOS ?”, *Real-Time Cosult*, www.realtime-info.be,

[18] Basseville M., Abdelghani M., Benveniste A., “Subspace-based fault detection algorithms for vibration monitoring”. *Automatica*, vol.36, no 1, Jan. 2000, pp.101-109.

[19] Basseville A., Benveniste A., Moustakides G., Rougee A.: “Detection and diagnosis of changes in the eigenstructure of nonstationary multivariable systems”. *Automatica*, vol.23, no 4, July 1987, pp.479-489.

[20] Favoreel W., De Moor B., Van Overschee P., "Subspace State Space System Identification for Industrial Processes", in *Proc. of the 5th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Processes and Systems (DYCOPS)*, Corfu, Greece, Jun. 1998, 6 p.

[21] L. Hermans, H. Van der Auweraer, *Modal Testing and Analysis of Structures under Operational Conditions: Industrial Applications*, *Mechanical Systems & Signal Processing*, Vol.13, No.2, pp.193-216 (, 1999).

[22] Cholewa W., *Dynamiczne systemy doradcze w diagnostyce technicznej*, *Materiały II Kongresu Diagnostyki Technicznej*, T.1, str. 57-84, Gdańsk, 1996.

[23] Cholewa W., Kiciński J., *Odwrotne model diagnostyczne*, *Wyd. Polit. Śląskiej*, Gliwice, 1997.

- [24] Natke H.G., Cempel C., Model-aided diagnosis of Mechanical systems, Springer – Verlag, Berlin Heilderberg, 1997.
- [25] Kiciński J., Computer Analysis in optimization and Diagnostics of Technical Objects, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Warsaw, 2001, pp. 219- 231.
- [26] DT200-1. System diagnostyczny dla turbozespołów energetycznych o mocy 200 MW, Praca zbiorowa pod red. W. Cholewa, J. Kiciński, Gdańsk, 1998.
- [27] Barszcz T., AIDA II Zintegrowany system monitorowania i diagnozowania stanu bloku energetycznego, Energetyka, no.1, 2001.
- [28] Materiały informacyjne firm: IRD, Prueftechnik, InTouch, PI, ALSTOM POWER (AIDA 951), BN 3500, Schenck
- [29] Sacha K., „Systemy czasu rzeczywistego”, PW, Warszawa, 1998.
- [30] www.wrs.com
- [31] www.qnx.com
- [32] „Can NT 4 be used as an RTOS?”, Real-Time Consult, www.realtime-info.be
- [33] „RTX vs. Windows NT performance” www.vci.com
- [34] Barszcz T., Miękina L., Uhl T. „Application of modular diagnostics system in power generation industry” ICC 2001, Krynica, 2001
- [35] Barszcz T., Uhl T., „AIDA 951- turbosets monitoring and diagnostics system”, ICC 2000, Podbanske, Słowacja



Dr inż. **Tomasz Barszcz** – absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Gdańskiej (1993r.), tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 1997r. na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH. Od 1994 r. pracuje w ABB Zamech Ltd (obecnie ALSTOM Power). W latach 1995-1997 prowadził projekt systemu diagnostycznego AIDA. W latach 1997-1999 pracował jako kierownik Działu Rozwoju Turbin. Od roku 2000 pracuje jako adiunkt w Katedrze Robotyki i Dynamiki Maszyn na Akademii Górniczo-Hutniczej. Zajmuje się problematyką diagnostyki w energetyce. Bierze udział w międzynarodowych projektach w tej dziedzinie.

Tadeusz Uhl – informacje na stronie 12.