

**Tomasz BARSZCZ, Adam JABŁOŃSKI**  
 AKADEMIA GÓRNICZO – HUTNICZA IM. ST. STASZICA W KRAKOWIE

## Centrum diagnostyczne maszyn – propozycja architektury

Dr inż. Tomasz BARSZCZ

Absolwent Wydziału Elektroniki Politechniki Gdańskiej (1993 r.). Tytuł doktora nauk technicznych uzyskał w 1997 r. na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, gdzie od 2000 r. pracuje jako adiunkt w Katedrze Robotyki i Mechatroniki. Zajmuje się diagnostyką maszyn oraz systemami monitoringu i diagnostyki. Jest autorem 4 książek i ponad 60 artykułów z tej dziedziny. Opracowane przez niego systemy pracują na stu kilkudziesięciu instalacjach w kraju i za granicą.

e-mail: [tbarszcz@agh.edu.pl](mailto:tbarszcz@agh.edu.pl)



Mgr inż. Adam JABŁOŃSKI

Absolwent Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH (2008 r.) oraz Central Texas College, Killeen, TX, USA. Obecnie inżynier diagnosta w EC Systems i doktorant WIMiR, AGH. Zajmuje się algorytmami przetwarzania sygnałów dla potrzeb diagnostyki maszyn.

e-mail: [ajablonski@energocontrol.pl](mailto:ajablonski@energocontrol.pl)



### Streszczenie

Artykuł przedstawia koncepcję Centrum Diagnostycznego – zbioru zintegrowanych modułów oprogramowania stworzonych z wykorzystaniem nowoczesnych technologii akwizycji, przesyłania, przechowywania oraz dostępu do danych. Dzięki zastosowaniu Centrum możliwe jest znaczne zautomatyzowanie pracy diagnostów nadzorujących wiele systemów monitorowania i diagnostyki. W artykule przedstawiono architekturę Centrum oraz szczegółowo opisano wybrane elementy Modułu Analiz, składającego się z narzędzi diagnostycznych wykorzystujących zaawansowane metody przetwarzania sygnałów. Centrum Diagnostyczne pokazane jest jako możliwe rozwiązanie problemu analizowania gwałtownie rosnących ilości rejestrowanych danych.

**Słowa kluczowe:** monitorowanie, centrum diagnostyczne.

### Machine diagnostic center – proposal of the architecture

#### Abstract

The paper presents the concept of the Diagnostic Center – an integrated set of software modules created with the use of modern data acquisition, data transfer, data storage, data analysis, and data access techniques. Firstly, the authors discuss the issues and challenges concerning integrated systems of monitoring and diagnostics, along with currently available solutions. One of important problems is handling of huge data amounts, acquired by a growing number of monitoring systems. Secondly, the concept and the architecture of the Diagnostic Center composed of general six modules is demonstrated. Particular modules concern following areas: on-site diagnostic and monitoring systems, data acquisition, data analysis, database server, data visualization, and remote client service. Furthermore, selected elements of the Analyses Module composed of diagnostic tools utilizing advanced signal processing techniques are described in details. Finally, benefits of implementation of Diagnostic Center are listed.

**Keywords:** monitoring, diagnostic center.

### 1. Wstęp

Wzrastająca ilość zainstalowanych systemów diagnostycznych zwiększa wymagania stawiane co do czasu potrzebnego na analizę danych oraz objęcie odpowiednim nadzorem wszystkich elementów maszyn w zakładach przemysłowych wyposażonych w służby diagnostyczne. Standardowe maszyny występujące w większości obiektów takie jak np. sprężarki czy wentylatory wymagają do pełnego diagnozowania stanu systemów diagnostycznych bazujących na 8 (czy też w większych maszynach 16 – 32) torach pomiarowych. Rejestracja danych ustawiona przynajmniej raz na jedną próbkę drganiową na dobę, dochodząca czasem do 24 próbek na dobę oraz z wielokrotnioną ilością zainstalowanych kanałów generuje gigabajty danych w krótkim okresie czasu [1].

Najefektywniejszym sposobem uniknięcia strat wynikających z zaburzenia procesu produkcyjnego na skutek awarii maszyn jest wdrożenie nadzoru diagnostycznego nad parkiem maszynowym. W dużych zakładach koszty takiej inwestycji potrafią zwrócić się poprzez uniknięcie choćby jednej awarii maszyn. Jednak warunkiem

koniecznym jest sumienne przeglądanie zarejestrowanych danych oraz ich szczegółowa analiza przez wyspecjalizowany personel.

Pomocnym rozwiązaniem jest zastosowanie systemu informacyjnego, który może być określony jako Centrum Diagnostyczne. System taki powinien zapewnić wsparcie dla przedsiębiorstw posiadających maszyny wyposażone w systemy monitorowania i diagnostyki. Jego głównym zadaniem jest integracja danych ze wszystkich systemów monitorowania w jednej bazie danych oraz zautomatyzowanie podstawowych analiz. Bardzo ważną funkcją jest też zapewnienie zdalnego dostępu do danych, w tym też przez bezpieczne łącza w sieci Internet (tzw. ekstrasnet). Skorzystanie z nadzoru diagnostycznego poprzez Centrum Diagnostyczne może zaoszczędzić wiele wysiłku służb utrzymania ruchu na rutynowe działania i poświęcić dużo więcej czasu utrzymanie ciągłości produkcji oraz uniknięcie poważnych awarii.

### 2. Rozwój koncepcji Centrum Diagnostycznego

Pierwsze znane autorom prace na temat konieczności analizy danych na poziomach wyższych niż poziom zakładu były publikowane na początku lat 90-tych. Opracowano je jako dalsze rozwinięcie kolejnych generacji systemów diagnostyki, w pracach Krzyżanowskiego i Kicińskiego [2] oraz Cempla i in. [3]. Dużym krokiem w rozwoju tych koncepcji był projekt badawczy DT-200 koordynowany przez IMP PAN. Opis wyników projektu znaleźć można w pracy Cholewy i Kicińskiego [4]. Należy tu jednak dodać, że propozycje te były ukierunkowane na duże turbospoły energetyczne, a głównym kierunkiem badań było opracowanie systemu na poziomie elektrowni oraz opracowanie metod diagnostyki opartych na sztucznej inteligencji.

Zagraniczne prace nad centrami diagnostycznymi rozpoczęto w latach 90-tych. Koncentrowały się one na maszynach krytycznych w energetyce. Wymienić tu należy następujące inwestycje, przeprowadzone przez przedsiębiorstwa komercyjne przy udziale jednostek naukowych [1]:

- centrum Westinghouse (później General Electric) w Orlando, Floryda (USA),
- centrum Electricite de France,
- centrum ALSTOM Power w Baden, Szwajcaria.

Z uwagi na koszty technologii były to rozwiązania bardzo drogie, w większości dedykowane do turbospołów energetycznych. W rozwiązaniach tych pojawiła się koncepcja dwutorowej analizy danych, na poziomie lokalnym (zakładu) oraz globalnym (centrum). Propozycję takiej architektury, przeznaczonej przede wszystkim dla turbospołów gazowo-parowych, zamieszczono w [5]. W roku 2006 Han i Yang zaproponowali pojęcie *e-maintenance*, przedstawionego jako część składowa podejścia określanego jako *e-manufacturing* [6]. W pracy opisali oni hipotetyczny system wspomagania służb utrzymania ruchu i przedyskutowali możliwość zastosowania dla zespołu silników elektrycznych. W kolejnych latach coraz częściej w propozycjach systemów monitorowania i diagnostyki brano pod uwagę Internet

i urządzenia mobilne. Ciekawymi przykładami takich systemów mogą być np. [7, 8].

W ostatnich latach pojawiło się kilka prac proponujących różnorodne technologie do gromadzenia i analizy danych na potrzeby utrzymania ruchu. Szeroki przegląd bieżącego stanu wiedzy w tej dziedzinie przedstawił Campos w [9].

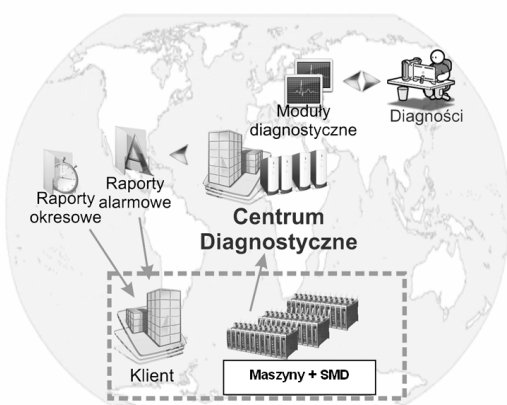
Cechą szczególną niniejszej pracy jest zaprezentowanie zintegrowanego podejścia do realizacji architektury Centrum Diagnostycznego. W propozycji zaproponowanej w dalszej części pracy przedstawiono propozycję takiej architektury. Szczególny nacisk położono na taki dobór rozwiązań, które umożliwią praktyczną realizację Centrum Diagnostycznego przy stosunkowo niewysokich kosztach.

### 3. Zasada działania Centrum Diagnostycznego

Zadaniem Centrum Diagnostycznego jest objęcie nadzorem diagnostycznym wielu maszyn, które mogą się znajdować w różnych przedsiębiorstwach i różnych krajach. Struktura Centrum Diagnostycznego nie powinna więc ograniczać możliwości lokalizacji nadzorowanych maszyn. Schemat działania Centrum Diagnostycznego przedstawiono na rys. 1.

Pierwszym zadaniem Centrum Diagnostycznego jest akwizycja i przechowywanie danych. Zadanie to polega na okresowym pobieraniu danych z systemów monitorowania i diagnostyki oraz archiwizacji danych na wspólnym serwerze. Dzięki temu dane są zabezpieczone przed utratą w wyniku np. awarii dysku. Dane podlegają akwizycji, przetwarzaniu, archiwizacji oraz analizie.

Po analizie diagnostycznej, wykonywanej przez ekspertów Centrum, przygotowywane są okresowe raporty określające zdolność poszczególnych obiektów oraz prognozy ewentualnych napraw bądź usług serwisowych. Raporty są generowane cyklicznie, najczęściej co 3-6 miesięcy, w zależności od rodzaju maszyny. W przypadku wykrycia nagłego uszkodzenia, wykonywana będzie analiza i przygotowany będzie raport alarmowy.

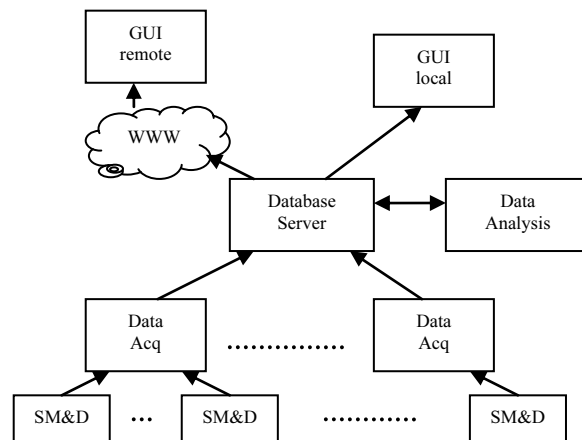


Rys. 1. Schemat działania Centrum Diagnostycznego  
Fig. 1. Scheme of the Diagnostic Center operation

Na poziomie Centrum Diagnostycznego częste jest również testowanie samych algorytmów, pracujących w wersji prototypowej. Algorytmy Centrum Diagnostycznego są "mniej ostrożne", tj. mogą generować więcej ostrzeżeń niż algorytmy samych systemów monitorowania zainstalowanych na obiektach. Wynika to z innego profilu użytkowników na obu poziomach. W Centrum Diagnostycznym analizą danych zajmują się specjaliści, którzy łatwo są w stanie odróżnić alarm fałszywy od prawdziwego. Na poziomie zakładów natomiast z systemu korzystają np. operatorzy bez specjalistycznej wiedzy konstruktorskiej ani diagnostycznej. Dla tego typu użytkowników nie jest dopuszczalne generowanie fałszywych alarmów.

### 4. Architektura Centrum Diagnostycznego

Na Centrum Diagnostyczne składa się kilka współpracujących ze sobą modułów. Propozycję architektury Centrum przedstawiono na rys. 2. Objaśnienia skrótów znajdują się w kolejnych akapitach.



Rys. 2. Architektura Centrum Diagnostycznego  
Fig. 2. Architecture of the Diagnostic Center

Źródłem danych dla Centrum Diagnostycznego są systemy monitorowania i diagnostyki (SM&D), które tworzą pierwszą warstwę całości. Struktura Centrum nie nakłada ograniczeń na typ takiego systemu. Najwięcej informacji o stanie maszyn pochodzi z sygnałów drgań. Oprócz sygnałów drgań system może dodatkowo pobierać sygnały wolnozmiennne, które są traktowane jako kanały procesowe (np. moc, prędkość obrotowa, temperatury). Systemy takie najczęściej dokonują również wstępnego przetwarzania danych poprzez np. wyznaczanie energii w pasmach częstotliwości krytycznych monitorowanej maszyny [1].

Drugą warstwę tworzą moduły akwizycji danych (Data Acq). Ich zasadniczym zadaniem jest okresowe łączenie się z poszczególnymi systemami monitorowania i diagnostyki i przesyłanie danych do serwera bazy danych Centrum.

Centralnym elementem Centrum jest serwer bazy danych (Database Server). Jego zadaniem jest bezpieczne przechowywanie wszystkich nadsyłanych danych. Serwer musi przechowywać dane różnorodnych typów:

- dane o zdarzeniach (alarmach, zmianach konfiguracji),
- dane zapisywane podczas zdarzenia, służące do analizy zdarzenia (przebiegi drgań lub widma),
- dane o historii pracy („trendy”, np. moc, rms),
- wartości referencyjne,
- dane konfiguracyjne wraz z ich zmianami.

Istotnym wymaganiem jest bezpieczeństwo danych w Centrum Diagnostycznym. Z jednej strony oznacza to konieczność szyfrowania danych podczas akwizycji, z drugiej – konieczność kontroli dostępu użytkownika tylko do tych danych, do których jest upoważniony.

Zadaniem modułu analiz danych (Data Analysis) są różnorodne, zautomatyzowane i przeprowadzane w razie potrzeby, analizy danych. Wyniki wybranych analiz zapisywane są do bazy danych centrum. Funkcje tego kluczowego modułu będą opisane w kolejnym rozdziale.

Lokalny moduł wizualizacji (GUI local) pełni funkcje graficznego interfejsu użytkownika. Jest to niezależny program, który steruje działaniem Centrum Diagnostycznego oraz umożliwia przeglądanie i analizę danych. Z uwagi na stopień komplikacji zadań właściwa jest koncepcja oddzielnej aplikacji (tzw. thick client).

Klient zdalny (GUI remote) jest narzędziem dostępu do danych z wykorzystaniem interfejsu http, co pozwala na dostęp z poziomu przeglądarki internetowej, np. Internet Explorer, bądź Mozilla

Firefox. Z uwagi na ograniczenia technologiczne nie jest możliwe uzyskanie pełnej funkcjonalności lokalnego modułu wizualizacji, ale w zamian za to osiągnięty zostanie bardzo łatwy dostęp do danych. Podstawowa funkcjonalność klienta zdalnego to:

- podgląd stanu grupy maszyn,
- podgląd stanu pojedynczej maszyny,
- podgląd historii alarmów,
- uproszczone wykresy historii pracy i stanu dynamicznego.

Z uwagi na możliwość dostępu przez internet zasadnicze znaczenie będzie miało wykorzystanie technologii bezpiecznego dostępu do danych.

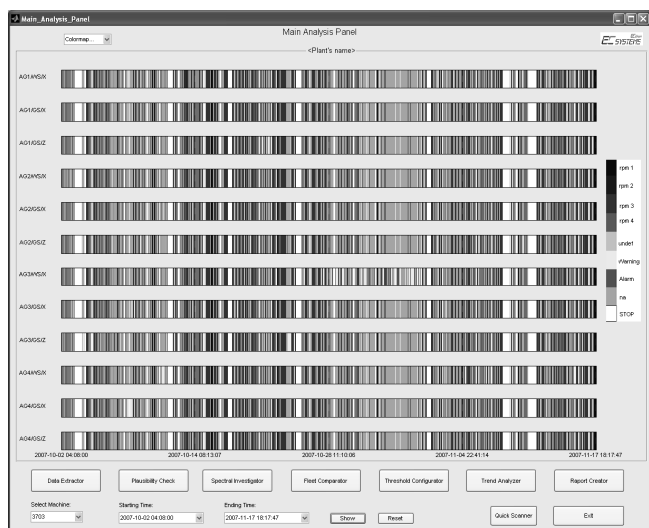
## 5. Moduł analiz danych

Kluczowym elementem procesu diagnostyki dostępnej w Centrum Diagnostycznym jest zautomatyzowanie możliwie dużej ilości czynności wykonywanych przez ekspertów. Zadania te realizowane są przez moduł analiz danych. W jego skład wchodzi kilka komponentów, które składają się na jedną z zasadniczych grup zadań. Poniżej wymieniono te grupy oraz podano nazwy poszczególnych narzędzi analiz wchodzących w skład modułu analiz danych:

- szybki przegląd danych przez diagnostę po ich zapisaniu do serwera bazy danych
  - Main Analysis Panel,
  - Quick Scanner,
- przygotowanie danych do dalszych analiz
  - Data Extractor,
  - Plausibility Checker,
- automatyczna analiza historii maszyny bazująca na analizie danych skalarnych
  - Trend Analyzer,
  - Fleet Comparator,
- zaawansowana analiza danych przez diagnostę
  - Spectral Investigator,
  - Threshold Configurator,
- zautomatyzowane tworzenie raportów diagnostycznych. Poniżej opisane zostaną wybrane z wymienionych komponentów.

### Main Analysis Panel

Narzędzie to prezentuje w przystępnej graficznej formie ogólny zarys pracy maszyny z uwzględnieniem postojów, stanów prac oraz zdarzeń (przede wszystkim wykrytych alarmów). Przykładowy ekran przedstawiono na rys. 3.



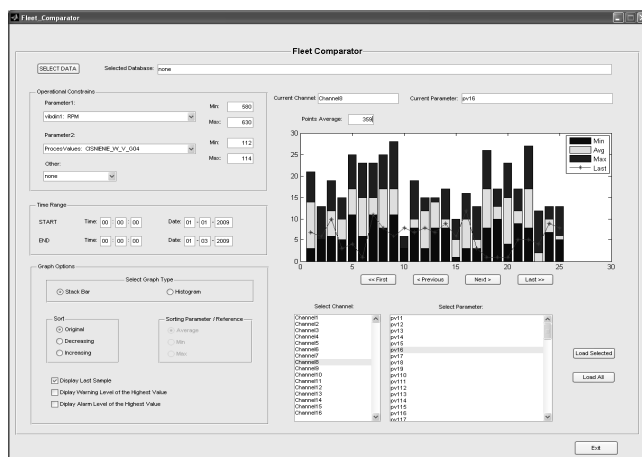
Rys. 3. Main Analysis Panel – przykładowy ekran  
Fig. 3. Main Analysis Panel – exemplary screen

Na podstawie przedstawionego ekranu można stwierdzić, iż dla badanej maszyny należy zwrócić uwagę na kanał AG3/WS/X (szósty wiersz od dołu), gdzie w ostatnim okresie czasu pojawiało się względnie wiele przekroczeń progów ostrzeżenia oraz alarmu (odpowiednio kolory: żółty i czerwony).

Dzięki zastosowaniu tego narzędzia możliwe jest szybkie przeglądnięcie nawet kilkumiesięcznego przedziału danych. Następnie możliwe jest dokładniejsze przedstawienie, bądź mniejszego okresu, bądź wybranego kanału z całej maszyny. W połączeniu z komponentem Quick Scanner, który pokazuje estymaty sygnału drganiowego o największej zmienności w stosunku do ich poziomów referencyjnych, jest to moduł stosowany przez diagnostę to wstępnego i szybkiego przeglądania dużej ilości danych, najczęściej z ostatniej replikacji.

### Fleet Comparator

W narzędziu tym zastosowano metody statystyczne do porównania grupy podobnych maszyn (floty). Metody te polegają na wyznaczeniu wartości statystycznych wybranego parametru i prezentacji danej maszyny na tle wartości statystycznych tego parametru dla reszty floty.



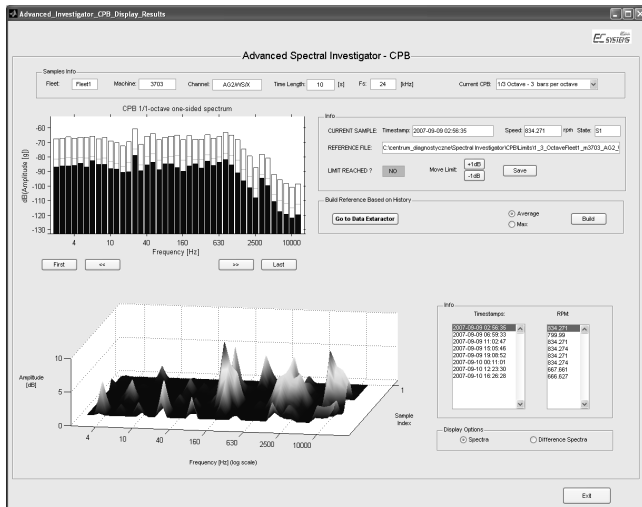
Rys. 4. Fleet Comparator – przykładowy ekran  
Fig. 4. Fleet Comparator – exemplary screen

Rys. 4 przedstawia przykładowy wykres słupkowy dla wybranego parametru maszyn, gdzie każdy słupek odpowiada wartościom statystycznym tego parametru dla kolejnych maszyn, (tu: od 1 do 25). Aplikacja oblicza wartości statystyczne dla każdej maszyny i dla zdefiniowanego okresu czasu, oznaczone odpowiednio kolorami niebieskim, zielonym i czerwonym. W innej formie prezentacji wyników wyznaczany jest rozkład wybranej wartości dla wszystkich maszyn oraz prezentowane jest położenie danej maszyny na tle całej floty.

### Trend Analyzer

Komponent ten wykonuje analizę trendów poszczególnych parametrów dla pojedynczej maszyny. Stosowane są tu funkcje regresji liniowej i wykładniczej z możliwością wystąpienia skoku. Funkcjonalność ta umożliwia wykrycie komponentu odpowiedzialnego za pogarszanie się stanu technicznego maszyny (np. bieżnia wewnętrzna konkretnego łożyska tocznego), a nawet w niektórych przypadkach oszacowanie prawdopodobnego okresu bezpiecznej eksploatacji.

Obie powyższe metody mogą być stosowane przez diagnostę, ale z uwagi na bardzo duże liczby analizowanych parametrów (ponad sto dla typowej turbiny wiatrowej razy np. sto monitorowanych turbin) podstawowym trybem pracy jest tu automatyczna analiza danych za ostatni okres, najczęściej ostatniej replikacji danych.

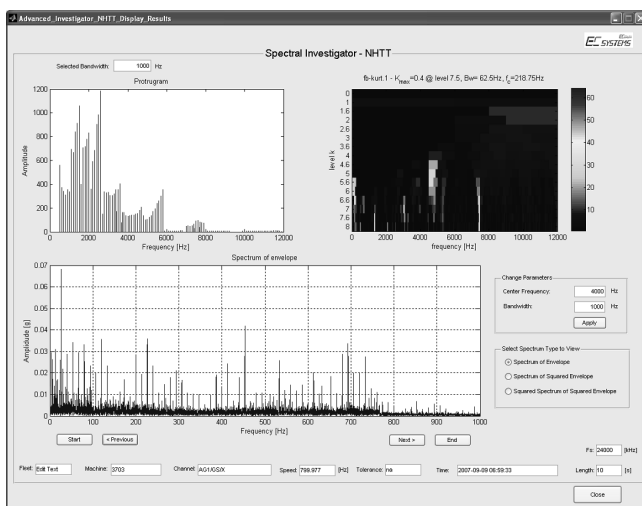


Rys. 5. Spectral Investigator (CPB) – przykładowy ekran  
Fig. 5. Spectral Investigator (CPB) – exemplary screen

### Spectral Investigator

Jest to narzędzie, które zawiera zaawansowane metody analiz wykorzystujące narzędzia bazujące na analizie widma sygnału. Narzędzie to posiada dwa niezależne komponenty, wykorzystujące techniki widmowe CPB (ang. *Constant Percentage Bandwidth*) oraz NEA (ang. *Narrowband Envelope Analysis*).

Metoda oparta na CPB ma na celu monitorowanie stanu oparte o analizę tzw. obwiedni widma. Widmo CPB zastosowano w celu niwelowania przesunięć częstotliwości przy niewielkiej zmianie charakterystyki pracy maszyny. Rys. 5 przedstawia przykładowy wynik dla widma 1/3 – oktawowego. Wykres 2D przedstawia pojedynczą próbkę wraz z naniesionymi progami alarmowymi, z wykres 3D w dolnej części wykresu – różnicę widma bieżącego i referencyjnego. Komponent CPB pozwala na określenie obwiedni widma, a następnie na analizę wielu widm i wykrycie przekroczenia zadanego progu w którymś z pasm częstotliwości.



Rys. 6. Spectral Investigator (NEA) – przykładowy ekran  
Fig. 6. Spectral Investigator (NEA) – exemplary screen

Metoda oparta na NEA to obliczanie widma częstotliwościowego sygnału zdemodulowanego dla zdefiniowanego pasma (rys. 4). Wybór w/w dwóch parametrów został zoptymalizowany dzięki użyciu *Kurtogramu* (prawy górny wykres) oraz *Protrugramu* (lewy górny wykres). Szczegóły użycia obu narzędzi zostały

opisane w [10]. Dzięki wykorzystaniu demodulacji sygnału drganiowego otrzymywane jest widmo obwiedni sygnału, które jest bardzo dobrą metodą wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych oraz niektórych uszkodzeń przekładni.

### 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono trudności powstające przy interpretacji danych z systemów monitorowania i diagnostyki. Rozpowszechnianie tych systemów prowadzi do konieczności analizy szybko rosnącej ilości danych (rzędu terabajtów dla typowego użytkownika). Z jednej strony wymaga to wyspecjalizowanych ekspertów, a z drugiej – ograniczania ich czasu poświęcanego na analizę pojedynczej maszyny w celu zapewnienia opłacalności ekonomicznej.

Proponowanym rozwiązaniem jest koncepcja Centrum Diagnostycznego, w którym możliwe byłoby gromadzenie danych z lokalnych systemów monitorowania oraz (w maksymalnym możliwym stopniu) ich zautomatyzowana analiza. W artykule opisano podstawowe funkcje Centrum oraz zaproponowano schemat jego działania. W kolejnej części zaproponowano architekturę Centrum oraz opisano funkcje poszczególnych jego modułów. Szczególną uwagę poświęcono modułowi analiz danych, który składa się z kilku narzędzi analiz danych.

Proponowana architektura jest w pełni elastyczna i umożliwia rozbudowę Centrum Diagnostycznego o kolejne moduły i narzędzia. Centrum zrealizowane według przedstawionej architektury wdrożono dla grupy stu kilkudziesięciu maszyn.

### 7. Literatura

- [1] Barszcz T.: Systemy monitorowania i diagnostyki maszyn, ITE, Radom 2006.
- [2] Krzyżanowski J., Kiciński J.: Koncepcja krajowego systemu III generacji do nadzorowania i diagnostyki turbozespołów energetycznych, Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej, nr 707, Łódź, 1994.
- [3] Cempel Cz., Cholewa W., Drobnik S., Kiciński J., Krzyżanowski J., Orłowski Z.: Systemy diagnostyki turbozespołów energetycznych nowej generacji, Przegląd Mechaniczny, nr 1-2, 1995.
- [4] Cholewa W., Kiciński J. (red.): DT200-1. System diagnostyczny dla turbozespołów energetycznych o mocy 200 MW, Gdańsk, 1998.
- [5] Barszcz T., Albini P., Donne M.: Integrated monitoring and diagnostic system for power plant services, Proc. of Russia Power, Moscow 2006.
- [6] Han T., Yang B.: Development of an e-maintenance system integrating advanced techniques, Computers in Industry, vol. 57, no. 6, ss. 569-580, 2006.
- [7] Campos J., Jantunen E., Prakash O.: Development of a maintenance system based on Web and mobile technologies, Journal of International Technology and Information Management, vol. 16, nr 4, ss. 1-8, 2007.
- [8] Wang W., Tse P.W., Lee J.: Remote machine maintenance system through Internet and mobile communication, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 31, nr 7-8, ss. 783-789, 2007.
- [9] Campos J.: Development in the application of ICT in condition monitoring and maintenance, Computers in Industry, vol. 60, no. 1, ss. 1-20, 2009.
- [10] Jabłoński A.: Development of algorithms of generating an envelope spectrum of a vibration signal in the frequency domain for rolling element bearing fault detection, MSc thesis, AGH University of Science and Technology, Kraków, 2008.