

Ryszard Nowicki, GE POWER CONTROLS Sp. z o.o., Poznań, Polska  
 Mark Bate, GE INTELLIGENT PLATFORMS, Chester, United Kingdom

## INTELLIGENTNE PODEJŚCIE W ROZPOZNAWANIU ANOMALII PRACY MASZYN NAPĘDZANYCH SILNIKAMI ELEKTRYCZNYMI

### AN INTELLIGENT APPROACH TO ANOMALY DETECTION AT WORK OF MACHINES DRIVEN BY ELECTRIC MOTORS

**Streszczenie:** W dokumencie przedstawiono metodykę diagnostyczną dedykowaną silnikom elektrycznym i wykorzystującą detekcję anomalii. Omówiono ważność systemów diagnostyki dla predykcyjnego utrzymania ruchu oraz rodzaje zadań diagnostycznych, które mogą być rozwiązywane z pomocą detekcji anomalii. W części #2 zajęto się warunkami wdrożenia takiego podejścia diagnostycznego oraz jego fazami. W części #3 zaprezentowano kilka przykładów rezultatów analiz diagnostycznych osiągniętych z pomocą systemu rozpoznawania anomalii dla maszyn napędzanych silnikami elektrycznymi.

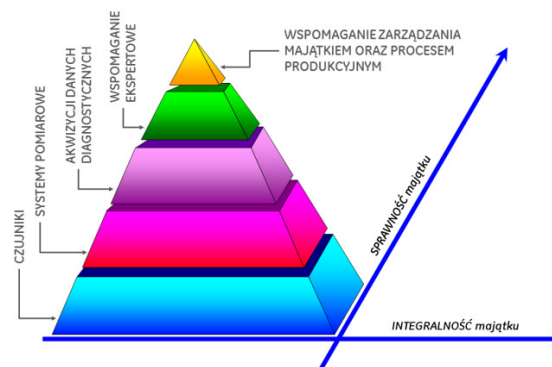
**Abstract:** This paper presents a diagnostic approach dedicated, to electric motors and using anomaly detection technology. There is provided description of importance of diagnostic system for the predictive maintenance approach, and types of tasks solved by typical diagnostic systems and by anomaly detection ones. Part #2 presents conditions and phases of an anomaly system implementation. There are presented some examples of outcomes from anomaly system applications for machines driven by electric motors in the part #3.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, rozpoznawanie anomalii, predykcyjne utrzymanie ruchu, silniki elektryczne  
**Keywords:** diagnostics, detection of anomalies, predictive maintenance, electric motors

## 1. Wprowadzenie

W [1] zaprezentowana została typowa struktura systemu wspomagania oceny stanu technicznego maszyn. Posiada on pięć warstw, a mianowicie: (i) czujniki, (ii) system pomiarowy realizujący funkcję monitorowania, (a także w przypadku ważniejszych maszyn zabezpieczeń), (iii) system akwizycji danych przydatny służbom utrzymania ruchu (=UR) w ocenie diagnostycznej majątku, (iv) system wspomagania ekspertowego oceny stanu technicznego (tu następuje automatyczny proces konwersji danych diagnostycznych w informacje użyteczne dla służb UR) oraz finalnie (v) system wspomagania zarządzania majątkiem.

Powyższy struktura jest dedykowana ocenie stanu technicznego maszyn w zakresie ich *integralności mechanicznej*. Natomiast drugim ważnym elementem w ocenie stanu technicznego jest *sprawność* działania, która może być oceniona dzięki pomiarom realizowanym na rzecz procesu produkcyjnego [2]. W konsekwencji w/w struktura może być przedstawiona, jako struktura przestrzenna, gdzie trzecim wymiarem jest *sprawność termodynamiczna* (w literaturze anglojęzycznej ten wymiar opisywany jest także jako *Asset PERFORMANCE Management*).



Rys. 1. Komponenty systemu nadzoru stanu technicznego i ich wzajemne pozycjonowanie

W przypadku oceny *sprawności* niezbędne jest także korzystanie ze struktury analogicznej, jak stosowana na rzecz oceny integralności mechanicznej.

Systemy wspomagające predyktywne UR można podzielić na 3 kategorie [2]:

(A) Systemy ekspertowe typu „czarna skrzynka”, które są najczęściej dedykowane określonej klasie maszyn. Instaluje się standardowe oprogramowanie, a następnie je konfiguruje wprowadzając pewien zestaw danych charakteryzujących tę konkretną maszynę (np. obroty robocze, częstotliwości rezonansowe, etc.).

Systemy typu „czarna skrzynka” nie dają możliwości ich modyfikowania oraz nie mogą być rozszerzone o dodatkowe reguły ekspertowe.

(B) Systemy detekcji anomalii. W tej kategorii stosowane są różne rozwiązania, które w ogólności można podzielić na dwie podgrupy:

(B.i) Rozwiązania sprzętowe posiadające inteligencję zaprogramowaną na poziomie *firmware*. Przykładem takiego rozwiązania jest dedykowany agregatom napędzanym przez silniki elektryczne system AnomAlert<sup>i</sup> [1,3]. W tym przypadku do każdego agregatu musi być przyporządkowany pojedynczy system monitorowania anomalii.

(B.ii) Rozwiązania softwarowe, w których na komputerze jest zainstalowane specjalne oprogramowanie dedykowane rozpoznawaniu anomalii. W tym przypadku pojedynczy serwer może prowadzić detekcję anomalii dla większej grupy maszyn i urządzeń. Przykładem takiego systemu jest Proficy\*SmartSignal [4,5,6].

(C) Systemy ekspertowe modyfikowalne: ta grupa systemów może być modernizowana i rozbudowywana przez użytkownika. Zostały one wprowadzone do stosowania na początku tego wieku. Przykładem takiego rozwiązania jest patent [7] i zbudowany na jego bazie SYSTEM 1, który dodatkowo w stosunku do funkcjonalności „(A)” umożliwia programowanie nowych reguł nie tylko z wykorzystaniem liczb i parametrów, ale także z pomocą funkcji.



Rys. 2. Zadania rozwiązywane z pomocą diagnostyki niższego poziomu

Oznacza to, że do budowania nowych reguł mogą być wykorzystywane sygnały dynamiczne generowane przez czujniki wysokoczęstotliwościowe (drżania mechaniczne, pulsacje ciśnienia, sygnały elektryczne klasy AC), a oprogramowanie narzędziowe wykorzystywane na oko-

<sup>i</sup> System AnomAlert może być także wykorzystywany w detekcji anomalii dla pracy generatorów.

liczność budowania nowych reguł udostępnia również szereg narzędzi umożliwiających działania na sygnałach dynamicznych. W/w narzędzia wspomagające przede wszystkim predyktywną (lub silniejszą) strategię UR możemy podzielić na rozwiązania diagnostyczne (a) niższego i (b) wyższego poziomu. Obszar zastosowań tych systemów został pokazany na Rys. 2 i Rys. 3. Diagnostyka niższego poziomu sprowadza się do detekcji anomalii tak w odniesieniu do integralności mechanicznej, jak i do sprawności majątku, a także do instrumentalizacji wykorzystywanej do pomiarów na rzecz obu wymienionych zadań. Diagnostyka wyższego poziomu umożliwia na ogół postawienie szczegółowej diagnozy. Jest ona przede wszystkim ukierunkowana na detekcję uszkodzeń majątku produkcyjnego, ale w niektórych przypadkach także umożliwia diagnostykę i w konsekwencji optymalizację procesu produkcyjnego, co służy zwiększeniu sprawności termodynamicznej systemu. Oprócz wyżej omówionego zróżnicowania celów stawianych zastosowaniom obu typów systemów, z punktu widzenia służb UR, jest jeszcze jedna cecha funkcjonalna różniąca obszary zastosowań.



Rys. 3. Zadania rozwiązywane z pomocą diagnostyki wyższego poziomu

W diagnostyce wyższego poziomu często są wykorzystywane sygnały dynamiczne. Natomiast w przypadku diagnostyki niższego poziomu, kiedy to celem detekcji nie jest jakieś określone uszkodzenie, a jedynie stwierdzenie anomalii, dla celów analizy wykorzystywane są pierwszoplanowo statyczne dane pomiarowe dostępne w DCS'ie. W [1] pokazano niezbędne zaawansowanie systemu nadzoru stanu technicznego wymagane dla różnych strategii UR. Różne techniki wykorzystywane na rzecz diagnostyki umożliwiają generowanie informacji o pogarszającym się stanie technicznym

z różnym wyprzedzeniem w stosunku do uszkodzenia funkcjonalnego. Na Rys. 4 pokazano przykład takiego oszacowania z wykorzystaniem stosowanej w UR krzywej P-F [8,9].



Rys. 4. Przydatność systemów nadzoru na rzecz detekcji zmian stanu technicznego na tle krzywej P-F

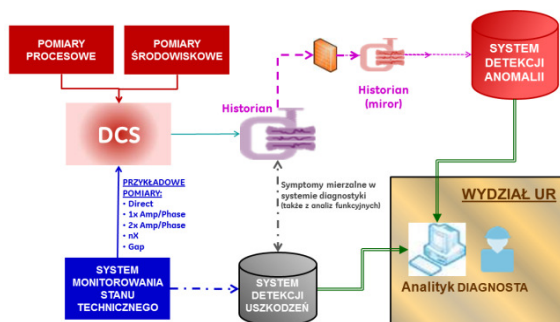
Na rysunku tym pokazano, że stosowanie bardziej zaawansowanych systemów nadzoru stanu technicznego umożliwia przejście od prewencyjnej do predykcyjnej strategii UR, a wdrożenie systemów detekcji anomalii umożliwia wcześniejsze rozpoznanie punktu „P”.

## 2. Mechanizm detekcji anomalii

Podobnie jak w przypadku rozwiązania sprzętowego do detekcji anomalii silników elektrycznych [3], to także w przypadku rozwiązań programowych (np. SartSignal) pierwszą fazą działania systemu jest proces samouczenia. Natomiast to, co czyni łatwiejszym wykorzystanie systemów programowych od rozwiązań sprzętowych, to brak jakichkolwiek powiązań analogowych z obiektem poprzez układy WEJŚĆ – WYJŚĆ.

Rozwiązania programowe wykorzystują dane gromadzone w istniejących już bazach danych (najczęściej komputera dedykowanego gromadzeniu informacji historycznych).

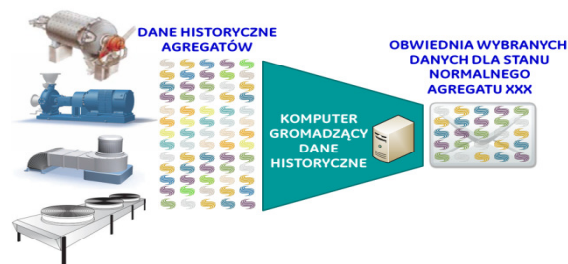
Na Rys. 5 pokazano typową strukturę umożliwiającą detekcji anomalii drogę komputerową.



Rys. 5. Schemat interfejsowania systemu detekcji anomalii

Dane procesowe, symptomy stanu technicznego oraz pomiary środowiskowe są gromadzone przez *serwer danych historycznych*, który przekazuje dane do *lustrzanego serwera danych historycznych*. Połączenie między obydwoma serwerami jest zabezpieczone *zaporą sieciową* uniemożliwiająca zaburzenie poprawności działania sieci technologicznej ze strony urządzeń i oprogramowania znajdujących się na zewnątrz instalacji produkcyjnej (włączając w to specjalistyczne oprogramowanie detekcji anomalii). Oprogramowanie detekcji anomalii wykorzystuje zaawansowane procedury przetwarzania danych (często opatentowane – jak w przypadku systemu SmartSignal). Na etapie implementacji systemu wykorzystywane są stosowne modele dla różnych maszyn i procesów wykorzystujące wybrane zmienne z dostępnego zbioru pomiarów. W pierwszej fazie implementacji systemu detekcji anomalii generowane są *wzorce (obwiednie) stanów normalnych* na bazie historycznych baz danych. Następnie (już w trybie On-Line) generowane *modele bieżące* celem ich porównywania ze *wzorcami*.

AGREGATY:



Rys. 6. Generowanie obwiedni stanów normalnych maszyn w procesie nauki

W przypadku rozpoznania przez *system detekcji anomalii* lub *system detekcji uszkodzeń* odstępstwa od normalnego stanu technicznego lub *anomalii procesowej* zostaje przekazywana stosowna informacja do wydziału UR i operatorów odpowiedzialnych za realizację procesu produkcyjnego.

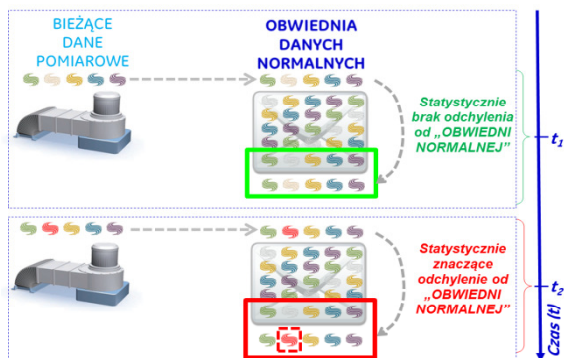
## 3. Przykłady rozpoznawania anomalii

Poniżej zostaną omówione trzy przykłady detekcji anomalii dla agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi. W każdym z prezentowanych przykładów dla monitorowania anomalii jest wykorzystywany outsourcing i monitorowanie było prowadzone z odległego centrum diagnostycznego zwanego w skrócie A&PC<sup>ii</sup>.

<sup>ii</sup> A&PC = Application & Performance Center

Dla wszystkich prezentowanych danych pokazane są dwie krzywe: *granatowa* – odpowiadająca bieżącym danym pomiarowym oraz *zielona* – odpowiadająca oczekiwany wartościom pomiarowym (generowanym z pomocą opracowanego wcześniej modelu).

W przypadkach, w których wartości pomiarowe zaczynają się istotnie różnić od wartości oczekiwanych nad krzywymi pojawiają się (w górnej części wykresu) symbole graficzne informujące o wystąpieniu anomalii.

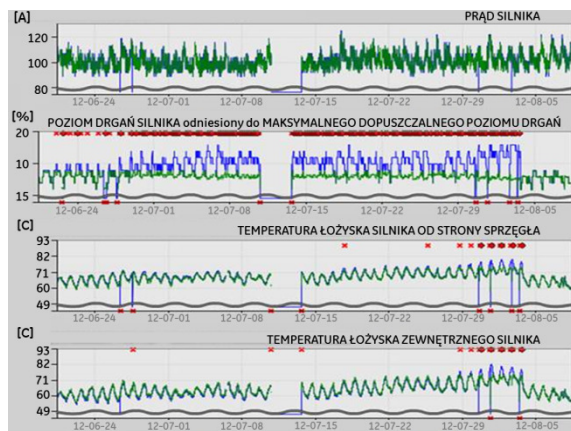


Rys. 7. Porównywanie bieżących danych pomiarowych z „OBWIEDNIĄ NORMALNĄ”

#### 4. Przykład z zakładu chemicznego

**Co zostało zauważone przez oprogramowanie:**

W trzeciej dekadzie czerwca SmartSignal rozpoznał wolny wzrost poziomu drgań silnika napędzającego sprężarkę tłokową. Oczekiwane wartości pomiarów winny cechować się zmiennością na poziomie ~13% maksymalnego dopuszczalnego poziomu drgań. Bieżące pomiary drgań (vide: Rys. 8) wskazywały bardzo nieznaczny wzrost powyżej poziomu oczekiwanego.



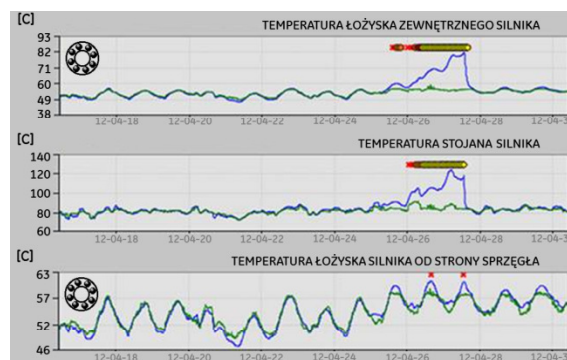
Rys. 8. Wybrane pomiary silnika pozwalają na stwierdzenie nieprawidłowości z różnym wyprzedzeniem

29 lipca spostrzeżono wzrost temperatur obu łożysk silnika. Użytkownik podjął decyzję o odstawieniu sprężarki i dokonaniu przeglądu agregatu.

**Gdzie leżała przyczyna:**

W czasie przeglądu stwierdzono, że śruby mocujące silnik do konstrukcji wsporczej są poluzowane. Naciąg śrub został skorygowany, a w ramach postoju podjęto dodatkowo decyzję o wymianie filtra powietrza silnika.

#### 5. Przykład z elektrowni węglowej



Rys. 9. Anomalia w pracy silnika spowodowana niedrożnym filtrem powietrza

**Co zostało zauważone przez oprogramowanie:**

26 kwietnia SmartSignal zidentyfikował szybki wzrost wybranych temperatur silnika napędzającego wentylator powietrza recyrkulacyjnego. Wzrost ten dotyczył temperatury łożyska zewnętrznego oraz stojana silnika (vide: Rys. 9). W normalnym stanie technicznym temperatura łożyska zewnętrznego winna zawierać się w przedziale ~50...60°C, a temperatura stojana winna wynosić ~80 °C, natomiast obydwie pomiary wzrosły odpowiednio do ~80 °C i ~120 °C. Stwierdzono również, że łożysko silnika od strony sprzęgła zaczęło się lekko przegrzewać, bowiem wartości temperatur przewyższyły o kilka stopni (3...6 °C) wartości oczekiwane. Po uzyskaniu powyższej informacji z A&PC użytkownik podjął decyzję o odstawieniu wentylatora i dokonaniu przeglądu agregatu.

**Gdzie leżała przyczyna:**

W czasie przeglądu stwierdzono niesprawność w systemie chłodzenia wynikającą z zapchania filtra powietrza. W konsekwencji dokonano wymiany filtra na nowy. W dniu 27 kwietnia A&PC powiadomił użytkownika, że stwierdzona anomalia pomiarów zniknęła bowiem wartości wszystkich symptomów kontrolowa-

nych w ramach modelu wróciły do poziomów oczekiwanych.

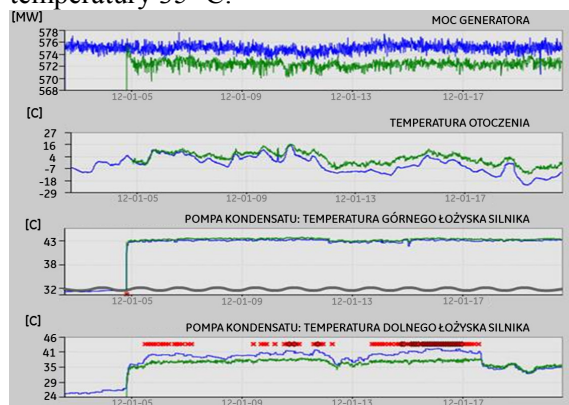
W przypadku włączenia takiego wentylatora do systemu zabezpieczeń i braku rozpoznania anomalii mogło nastąpić jego niekontrolowane przez operatorów wyłączenie rzutujące negatywnie na pracę elektrowni. Natomiast dłuższa praca agregatu w warunkach podwyższonych temperatur prowadziłaby do skrócenia okresu między remontowego silnika, a także mogłaby doprowadzić do uszkodzeń wtórnych.

## 6. Przykład z elektrowni jądrowej

### Co zostało zauważone przez oprogramowanie:

11 stycznia w jednej z elektrowni jądrowych SmartSignal rozpoznał podwyższenie temperatury dolnego łożysk silnika (vide Rys. 10) napędzającego pionową pompę kondensatu.

Węzeł łożyskowy przekroczył nieznacznie temperaturę 40 °C w sytuacji, kiedy oczekiwano temperatury 35 °C.



Rys. 10. Anomalia silnika spowodowana zakłóceniem chłodzenia konwekcyjnego

### Gdzie leżała przyczyna:

Mimo tego, że podwyższenie temperatury wciąż było daleko poniżej nastaw alarmowych, inżynier odpowiedzialny za utrzymanie ruchu był zainteresowany rozpoznaniem przyczyny zaobserwowanej anomalii. Po udaniu się na wizję lokalną stwierdził, że wokół silnika zostało postawione rusztowanie powodujące utrudnienie w konwekcji powietrza wokół silnika.

Po rozpoznaniu przyczyny, inżynier UR zadysponował rozebranie rusztowania.

A&PC w krótkim czasie mogło potwierdzić służbom UR elektrowni, że rozpoznanie inżyniera i podjęta akcja były poprawne. Natychmiast po rozebraniu rusztowania (17 stycznia) stwierdzono ponowne zsynchronizowanie temperatur (wartości temperatury mierzonej w węz-

le łożyskowym z wartościami temperatury oczekiwany przez system rozpoznawania anomalii).

Brak poprawnego chłodzenia węzłów łożyskowych pompy prowadzi do skrócenia okresów między remontowych i mógł spowodować konieczność wcześniejszego odstawienia agregatu pompy kondensatu.

## 7. Zakończenie

Dążąc do zwiększenia efektywności produkcji coraz większe systemy produkcyjne są obsługiwane przez coraz mniejsze zespoły ludzkie. W artykule opisano zasady implementacji systemu detekcji anomalii w przedsiębiorstwie, które znacząco mogą przyczynić się w rozpoznawaniu małych zmian w dużych systemach pomiarowych.

Na kilku przykładach agregatów napędzanych silnikami elektrycznymi pokazano, jak wrażliwe jest to narzędzie na różnego typu zmiany stanu. Anomalie mogą dotyczyć tak stanu technicznego, procesu produkcyjnego jak i niepożądanych zmian warunków środowiskowych. Systemy detekcja anomalii umożliwiają rozpoznawanie nieprawidłowości pracy systemu produkcyjnego we wczesnej fazie zaawansowania nieprawidłowości, a więc dostarczają służbom UR informacje o zmianach stanu ze znaczącym wyprzedzeniem w stosunku do punktu „F” krzywej P-F.

## Literatura

- [1]. Nowicki R.: *Zróżnicowanie systemów On-Line nadzoru stanu technicznego agregatów z napędami elektrycznymi*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Nr 89/2011, str. 65-73.
- [2]. Nowicki R., Pappas Y.: *Intelligent Maintenance Support of Hydro Station Asset Management*, Proceedings of International Conf. OCT 29-31, 2012, Bilbao, Spain.
- [3]. Song J., Nowicki R., Duyar A., *Zastosowanie modelowania diagnostycznego dla wspomagania predykcyjnego utrzymania ruchu i zwiększenia efektywności energetycznej w hucie*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, 2013, przesłane do redakcji.
- [4]. Wegerich S., *Condition Based Monitoring using Nonparametric Similarity Based Modeling*, Proceedings, Japanese Maintenance Society Meeting 2006.
- [5]. Doan D., *SmartSignal\* is Now Part of GE – What Does it Mean for You?*, Orbit, Vol. 31, No2, 2011.
- [6]. Lebetter D., *Time To Value, Keynote speech, SmartSignal\**, Proceedings, Summit 2008.

[7]. US 6421571: *Industrial plant asset management system: apparatus and method*, 16 JUL 2002.

[8]. *RCM Guide For Facilities and Collateral Equipment*, NASA, September 2008.

[9]. Covino L., Hanifan M., *asset Management 101, Part 1: Maintenance Strategy Overview*, Orbit, Vol. 29, No1 2009, p. 30-35.

\*Znak towarowy GE Intelligent Platforms, Inc. SmartSignal jest znakiem towarowym SmartSignal Corporation, w całości należącej do GE Intelligent Platforms, Inc

## Autorzy



Dr inż. Ryszard Nowicki  
Ryszard.Nowicki@ge.com  
GE Power Controls Sp. z o.o.  
60-432 Poznań, ul. Myśluborska 62 / Polska  
(+48) 601 710 700



Mark Bate  
Mark.Bate@ge.com  
GE Intelligent Platforms  
Industrial Data Intelligence  
(+44) 7900 137 801