

Marek Sikora¹, Krzysztof Szczyrba^{1,2}, Łukasz Wróbel¹, Marcin Michalak¹

¹Institut Informatyki, Politechnika Śląska

ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice

{marek.sikora, lukasz.wrobel, marcin.michalak}@polsl.pl

²Somar S.A

ul. Karoliny 4, 40-186 Katowice

k.szczyrba@somar.com.pl

Monitorowanie i utrzymanie suwnicy bramowej na podstawie bezprzewodowego systemu pomiaru i analizy poziomu drgań

Słowa kluczowe: *czujnik drgań, system monitorowania, utrzymanie, suwnica, utrzymanie predykcyjne, eksploracja danych, analiza trendu*

Streszczenie: W artykule przedstawiono system monitorowania i diagnostyki suwnicy bramowej. Głównym zadaniem systemu jest akwizycja, wizualizacja i monitorowanie poziomu drgań newralgicznych elementów suwnicy. System wyposażony jest również w część obliczeniowo-analityczną umożliwiającą realizację zadań predykcyjnego utrzymania ruchu (ang. predictive maintenance) związanych z oceną poziomu drgań. Architektura systemu umożliwia wykorzystanie go również do innych zastosowań, w których dla realizacji zadań diagnostyki wymagana jest bezprzewodowa sieć czujników drgań.

1. Wstęp

Obecne systemy informatyczne monitorowania i diagnostyki obiektów przemysłowych oferują bogate możliwości przechowywania i przetwarzania danych. Od kilkunastu lat – zgodnie ze standardem ISA95 [11] – rysuje się coraz wyraźniejsza specjalizacja pozwalająca wyróżnić systemy: akwizycji danych pomiarowych, bieżącego monitorowania i wizualizacji procesów (HMI – Human Machine Interface; SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition), realizacji procesów (MES – Manufacturing Execution System) oraz systemy ERP (Enterprise Resource Planning) zapewniające kompleksowe wspomaganie zarządzania przedsiębiorstwem.

Dynamicznie rozwijającym się obszarem zastosowań systemów informatycznych jest obszar analityki danych i bazujące na nim nowe funkcjonalności pozwalające dostawcom i producentom uzyskiwać przewagę konkurencyjną. Z analizą danych gromadzonych przez systemy SCADA i MES związane są dwie grupy aplikacji: CMMS (Computerised Maintenance Management Systems) i DAP (Data Analytics Platforms). Aplikacje te w architekturze ISA95 należałoby umieścić pomiędzy MES i ERP. Aplikacje DAP zapewniają narzędzia i metody do budowy modeli diagnostycznych urządzeń lub analizy gromadzonych danych w celu np. poprawy procesów produkcyjnych.

W przedsiębiorstwach zdecydowanie rośnie świadomość dotycząca konieczności zatrudniania specjalistów z obszarów analizy danych (tzw. data scientist) budujących i utrzymujących modele diagnostyczne stosowane na przykład w predykcyjnym utrzymaniu ruchu (PdM - Predictive Maintenance [18]).

W niniejszym artykule przedstawiono system monitorowania i diagnostyki suwnicy bramowej. Suwnica będąca przedmiotem diagnostyki jest elementem linii transportu surowca stalowni konwertorowej jednego z zakładów hutniczych. Ze względu na fakt, że suwnica jest jednym z kluczowych elementów linii produkcyjnej, konieczne jest monitorowanie stanu suwnicy oraz – przynajmniej przybliżone – identyfikowanie momentu w czasie, w którym użytkowanie suwnicy stanie się niebezpieczne lub niemożliwe.

Źródłem danych jest bezprzewodowa sieć czujników drgań. Dane przetwarzane są za pomocą dedykowanego systemu typu SCADA, a część analityczna bazuje na środowisku analitycznym R [21].

Niniejszy artykuł zorganizowany jest w następujący sposób. W rozdziale 2 przedstawiono przykłady prac pokrewnych związanych z systemami dedykowanymi do diagnostyki urządzeń bazującej na analizie danych historycznych, w szczególności analizie poziomym drgań. W rozdziale 3 przedstawiono obiekt podlegający monitorowaniu oraz problem jego diagnostyki. Rozdział 4 zawiera opis obejmujący sprzętową i programową część systemu monitorowania. W rozdziale 5 przedstawiono proces analizy danych i wynikającą z niego procedurę diagnostyczną, której praktyczne zastosowanie przedstawiono w rozdziale 6. Rozdział 7 stanowi podsumowanie, przedstawiono w nim również koncepcję rozwoju systemu.

2. Prace pokrewne

Systemy komputerowe dedykowane do definiowania, monitorowania i prognozowania stanów diagnostycznych urządzeń można kategoryzować z różnych punktów widzenia. Jednym z takich sposobów jest ich podział na systemy szkieletowe [13] oraz dedykowane do konkretnego rozwiązania lub grupy rozwiązań (np. [17]). Metodyki realizacji zadań diagnostyki, utrzymania maszyn i urządzeń [29], predykcyjnego utrzymania ruchu [14,26] czy diagnostyki uszkodzeń [20,25,10] pozwalają na coraz efektywniejsze wykorzystanie parku maszynowego będącego w zasobach przedsiębiorstw.

W literaturze można spotkać dużą liczbę publikacji dotyczących diagnostyki. W zależności od stopnia skomplikowania urządzenia, jego budowy, przeznaczenia i sposobu eksploatacji, diagnostykę przeprowadza się w oparciu o zróżnicowane metody badawcze. Przykładowo, diagnostyka silników spalinowych pod kątem ich zużycia bardzo często przeprowadzana jest w oparciu o analizę spektrometryczną składu oleju pobranego z tych silników [12]. Znane są także prace, w których stosuje się analityczne podejście do modelowania procesu spalania oleju w tłokach w celu opisanie zależności zawartości zanieczyszczeń od upływu czasu [16]. Przykład ten ilustruje dwa główne podejścia do budowy modeli diagnostycznych, jedno bazuje na analizie zgromadzonych danych pomiarowych lub innych danych mających związek z monitorowaniem pracy urządzenia (np. obrazami termicznymi [9]), drugie na modelowaniu/symulacji działania diagnozowanego obiektu.

Ze względu na tematykę niniejszego artykułu na szczególną uwagę zasługują prace, w których wejściowym sygnałem będącym podstawą diagnostyki, są drgania generowane przez pracujące urządzenie. W pracy [6] monitorowano zachowanie pompy nurnikowej w żurawiu samochodowym poprzez akwizycję jej drgań w trzech wymiarach. Znane były widma pracy urządzenia w stanie poprawnym oraz pięciu niepoprawnych stanach diagnostycznych. Do klasyfikacji bieżącego stanu pompy zastosowano techniki

wnioskowania bayesowskiego, której parametry były strojone z wykorzystaniem algorytmu optymalizacji chmurą cząstek (ang. *particle swarm optimization*). W pracy [8] opisano zastosowanie zaawansowanej ekstrakcji cech z sygnałów drgań opisujących pracę silnika komutatorowego w dziedzinie częstotliwości.

Do celu analizy danych, których źródłem są czujniki drgań, stosuje się również transformatę falkową. Przegląd zastosowań tej metodyki do diagnostyki urządzeń przedstawiono w [19,27]. W szczególności metodę tę stosowano do wykrywania uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego [28], wykrywania uszkodzeń w sieciach przesyłowych [23], czy też uszkodzeń łożysk [15].

Przebiegi amplitudy drgań zazwyczaj nie są stacjonarne, z tego powodu do ich analizy stosuje się często tak zwaną kurtozę spektralną [1]. Metodę tę wykorzystano między innymi do wykrywania uszkodzeń w układach napędowych turbin wiatrowych [7], czy też oceny stanu łożysk [5].

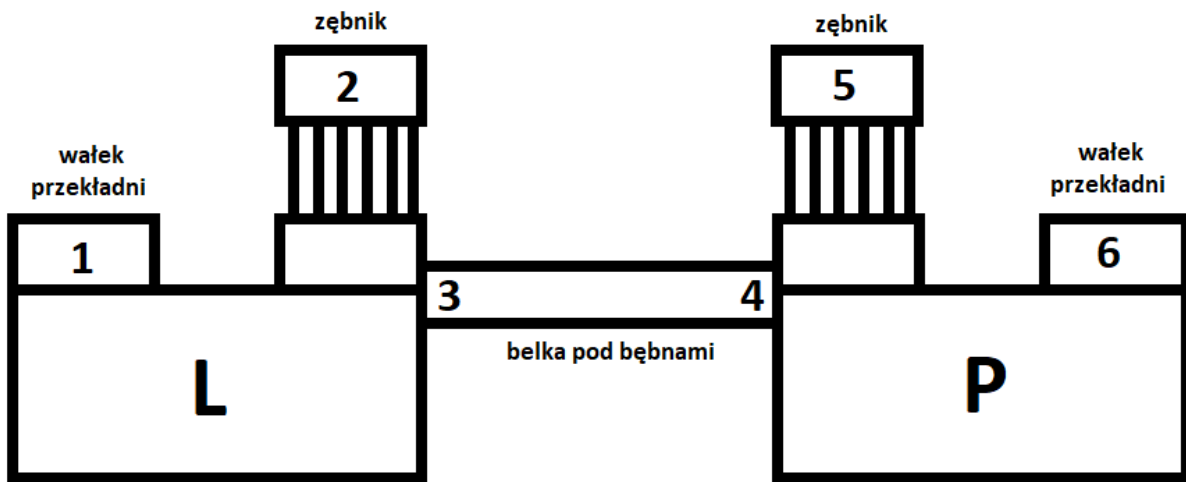
Kompleksowe ujęcie problematyki budowy modeli diagnostycznych na podstawie analizy drgań stanowi praca Samuela [22], w której przedstawiono wiele wariantów wykorzystania pomiarów drgań (począwszy od propozycji prostych wskaźników statystycznych w dziedzinie czasu i częstotliwości, poprzez transformację falkową, zastosowanie sieci neuronowych, aż po modelowanie matematyczne) do budowy modeli diagnostycznych urządzeń.

Bartelmus i inni w pracach [2], [3] podejmują z kolei temat uwzględniania podczas analizy drgań obciążenia, pod jakim w danej chwili pracuje urządzenie (np. przenośnik lub koparka kołowa). Wyodrębnienie składowej drgań wywołanych zmiennym obciążeniem urządzenia i odjęcie jej od oryginalnie zaobserwowanego szeregu drgań pozwala – w szczególnych przypadkach – na uzyskanie właściwych danych wejściowych dla procesu diagnostycznego.

3. Obiekt i cel monitorowania

Monitorowanym obiektem są dwie suwnice bramowe, każda o udźwigu 500 ton, pracujące w hali stalowni zakładu hutniczego. Suwnice są elementem linii transportu surowca w stalowni konwertorowej. Suwnica pobiera pełne kadzie z surówką z wózków transportowych, przemieszcza je w okolice gardzieli jednego z konwertorów, wlewa do nich surówkę, przechylając kadź odlewniczą, po czym odstawia puste kadzie na wózki transportowe.

Rysunek 1 przedstawia schemat układu napędowego odpowiedzialnego za podnoszenie i opuszczanie kadzi. Układ ten jest głównym miejscem, w jakim instalowane są czujniki drgań. Każda z suwnic posiada dwa napędy – lewy oznaczony na rysunku jako L oraz prawy oznaczony jako P. Napędy połączone są przez wałki napędowe z przekładniami zębatymi redukującymi prędkość obrotową bębnow głównego mechanizmu podnoszenia. Na rysunku przedstawiono również lokalizację czujników drgań, które umieszczone są na: wałkach napędowych (1, 6), łożyskach zębniaka (2, 5) oraz na belce wsporczej (3, 4). Czujniki o numerach 3 i 4 pełnią w zasadzie rolę pomocniczą, ich zadaniem jest monitorowanie poziomu drgań tła, mogą one stanowić punkt odniesienia dla pozostałych czujników. Istotne dla działania systemu diagnostyki (w szczególności dla fazy przygotowania danych) jest to, że dla różnych suwnic (nawet tego samego typu) bardzo trudne jest umiejscowienie czujników drgań dokładnie w tym samym miejscu.



Rysunek 1. Schemat układu napędowego suwnicy z naniesionymi miejscami zamontowania czujników drgań.

Poprawna praca suwnic jest jednym z kluczowych elementów zachowania ciągłości produkcji stali. Awaria suwnic oznacza brak możliwości zasilania konwertorów surowką dostarczaną z wielkiego pieca, co skutkuje niemożnością przekazania surowca do kolejnych etapów produkcji (ciągłego odlewania stali i walcowni), a w skrajnych przypadkach nawet do konieczności wygaszania pieca.

Suwnica pracuje w trudnych warunkach środowiskowych, jakim jest hala produkcyjna (Rys. 2). Mechanizm przekładni pracuje stale w obecności pyłu tlenków metalicznych, dostających się do jego wnętrza. Wpływ pyłu uwidacznia się znaczącym wzrostem poziomu drgań całej suwnicy, gdyż drgania przekładni przenoszone są na inne elementy, w tym elementy konstrukcji hali przemysłowej. W skrajnej sytuacji praca suwnicy staje się niemożliwa lub operatorzy zmuszeni są do redukcji biegów silników, co niekorzystnie wpływa na wydajność produkcji. W sytuacjach takich niezbędne jest wykonanie generalnego remontu przekładni.



Rysunek 2. Fragment obudowy układu napędowego suwnicy oraz widok hali produkcyjnej z poziomu pomostu operatorskiego.

Kluczowym zadaniem diagnostycznym jest analiza poziomu drgań i określenie na tej podstawie czy w horyzoncie kilku lub kilkunastu dni możliwe będzie dalsze normalne użytkowanie suwnicy. Procedura diagnostyczna powinna ułatwiać służbom utrzymania ruchu, podejmowanie decyzji dotyczących wykonania remontu czy też doraźnych – poza zaplanowanym harmonogramem – prac utrzymaniowych (np. wymianę oleju/smaru przekładniowego, kontrolę uzębienia wałów).

Z praktycznego punktu widzenia pożądanym jest aby procedura diagnostyczna była parametryzowalna, gdyż np. niemożność rozmieszczenia czujników drgań za każdym razem w tym samym miejscu powoduje, że poziomy drgań nieakceptowalne w jednym warunkach eksploatacyjnych mogą okazać się akceptowalne w innych warunkach. W przedstawionej w rozdziale 5 analizie danych dużą rolę odegrał fakt posiadania informacji pochodzących z tzw. dziennika zdarzeń, w którym zapisywane były wszystkie prace konserwatorskie i remontowe wykonywane na monitorowanym obiekcie. Informacje te wykorzystano do opracowania i oceny efektywności przedstawionej metody. Pozwoliło to m.in. odnieść poziom drgań do wykonanych prac remontowych i, w szczególności, nie traktować nagłych spadków poziomu drgań jako błędów danych.

4. System monitorowania

Głównym zadaniem systemu monitorowania jest akwizycja, monitorowanie i analiza poziomu drgań rejestrowanych przez czujniki. Śledzenie poziomu i dynamiki zmian drgań pozwala – poza bieżącą wizualizacją – na określenie momentu osiągnięcia ostrzegawczych i alarmowych poziomów drgań.

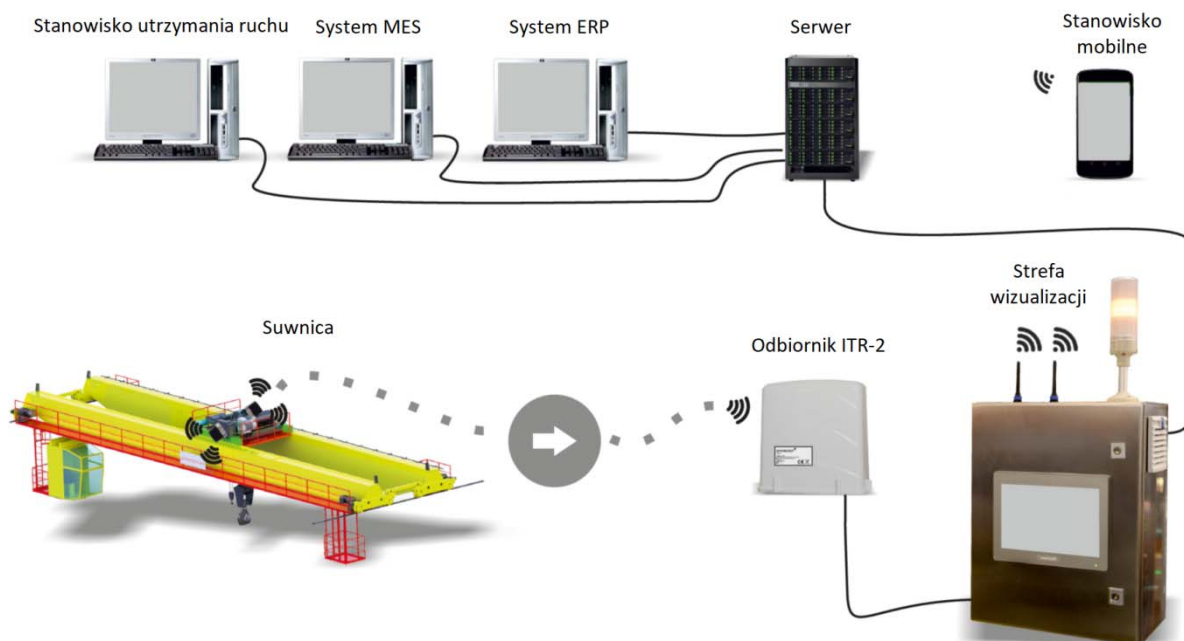
Głównym źródłem danych dla prezentowanego systemu są czujniki drgań montowane w niewygodnych punktach monitorowanych obiektów. Praktyka pokazuje, że punkty te są często zlokalizowane w miejscach trudnodostępnych. Równie często monitorowaniu podlegają ruchome części maszyn.

Warunki te zdecydowały o następujących głównych cechach omawianego systemu:

- czujniki montowane są na stałe w punktach pomiarowych,
- czujniki są bezprzewodowe (zasilane bateryjnie),
- czujniki są odporne na tzw. udary temperaturowe, gdyż okresowo mogą być narażone na kontakt z płomieniami,
- czujniki są pyłoszczelne, co pozwala je zabezpieczyć przed działaniem pyłu metalicznego,
- komunikacja z siecią czujników odbywa się drogą radiową z wykorzystaniem sieci transceiverów,
- część informatyczna systemu zrealizowana jest w architekturze klient-serwer:
 - serwer zapisuje, przechowuje i udostępnia pomiary gromadzone w bazie danych,
 - aplikacja kliencka o cechach systemu SCADA umożliwia definiowanie plansz i kokpitów menadżerskich (pozwalających na wizualizację pracy urządzenia, w tym rejestrowanego poziomu drgań) oraz generowanie raportów podsumowujących,
- integralną częścią systemu jest także serwer analityczny wykorzystujący środowisko R [21], na serwerze uruchamiane są procedury diagnostyczne związane z analizą danych, serwer dostarcza informacji o aktualnym stanie urządzenia.

Rysunek 3 przedstawia architekturę systemu dedykowanego do monitorowania suwnicy. Na komputerze *Serwer* zainstalowane jest oprogramowanie komunikacyjne (dokonujące akwizycji danych), serwer baz danych (PostgreSQL) oraz środowisko analityczne R. Komputer *Stanowisko utrzymania ruchu* reprezentuje aplikację klienta

(aplikacji takich może być wiele). Dodatkowo, system może udostępniać dane innym aplikacjom np. systemom klasy MES czy ERP.



Rysunek 3. Schemat systemu monitorowania drgań i diagnostyki maszyn z zastosowaniem bezprzewodowych czujników drgań.

W dalszej części rozdziału zostanie krótko opisany czujnik drgań wybrany do realizacji zadania monitorowania suwnicy oraz wybrane elementy aplikacji klienckiej.

4.1 Czujnik drgań

Przez drgania rozumie się ruchy oscylacyjne ciał fizycznych o określonej masie w założonym układzie odniesienia. Drgania mogą być opisane za pomocą jednego z trzech parametrów: przemieszczenia, prędkości lub przyspieszenia. Do diagnostyki wystarczającym jest pomiar jednego z tych parametrów – pozostałe można uzyskać na podstawie znanych zależności fizycznych. Najłatwiejszym sposobem pomiaru drgań dla wyższych częstotliwości jest pomiar przyspieszenia, ponieważ amplituda tej wielkości jest mierzalna w szerokim zakresie widma drgań.

Z punktu widzenia wymagań diagnostycznych czujnik powinien charakteryzować się jak najlepszą dokładnością i rozdzielczością pomiaru, szerokim pasmem przenoszenia i liniowością pomiaru w tym paśmie.

Zestawienie przykładowych czujników rozważanych do użycia jako źródła danych pomiarowych zamieszczono w Tabeli 1 (producentem pierwszego czujnika jest firma Banner Engineering, drugiego KCF Technologies, trzeciego Swift Sensors, czwartego EMAG-Servis, a ostatniego firma Somar).

Typ czujnika	QM42VT1	SD-VSN-2	201R	Pantera	WS-VT1
Odporność na trudne warunki środowiskowe (wilgotność, zapylenie, udary termiczne)	-	+	-	-	+
Możliwość pracy w atmosferach zagrożonych wybuchem gazów i pyłów	-	-	-	-	+
Pasma komunikacyjne	2,4GHz	2,4GHz	860MHz	Brak	860MHz
Czas działania w trybie podtrzymania baterijnego	+	+	+	-	+

Tabela 1. Zestawianie czujników umożliwiających pomiar przyspieszenia.

Z wymienionej listy najlepszym kandydatem do zastosowania – poza ostatecznie wybranym czujnikiem WS-VT1 – wydawał się czujnik typu SD-VSN-2. Jednakże ze względu na problemy z komunikacją, jakie odnotowano dla tego czujnika w hali produkcyjnej, w której pracuje suwnica podczas wdrożenia systemu zastosowano opracowany w Somar S.A czujnik WS-VT1. Jak widać w tabeli 1, czujnik ten charakteryzuje się wszystkimi wymaganymi dla rozważanego zastosowania cechami. W szczególności, jego pasmo komunikacyjne jest wystarczające do poprawnej transmisji danych w hali produkcyjnej. Dodatkowo, czujnik został zintegrowany z nadajnikiem radiowym.

WS-VT1 pozwala na pomiar przyspieszeń w trzech osiach, w zakresach $\pm 2g/\pm 4g/\pm 8g/\pm 16g$, w paśmie do 2,5 kHz. Czujnik pozwala także mierzyć temperaturę otoczenia. Za pomiar temperatury odpowiedzialny jest cyfrowy przetwornik temperatury dokonujący pomiaru z rozdzielczością 12-to bitową i z dokładnością 1°C w zakresie $-55\div+85^{\circ}\text{C}$. Oba przetworniki można wprowadzić w tryb uśpienia w celu oszczędzania energii. Pomiarami zarządza energooszczędny, szesnastobitowy mikrokontroler wyposażony w transceiver radiowy, pracujący w paśmie 860 MHz. Całość zasilana jest z baterii litowo-jonowej o rozmiarze $\frac{1}{2}$ AA i pojemności 1,2 Ah.

W podstawowym trybie pracy czujnik jest cyklicznie wybudzany ze stanu uśpienia w celu dokonania pomiarów przyspieszeń, temperatury oraz poziomu naładowania baterii. Drogą radiową czujnik wysyła następujące informacje:

- swój numer identyfikacyjny,
- wartość skuteczną i maksymalną drgań,
- wartość temperatury,
- poziom naładowania baterii.

Cykliczne usypianie i wybudzanie czujnika nie jest jedynym sposobem wykonywania pomiarów. Opracowane oprogramowanie wbudowane pozwala m.in. na zmianę częstotliwości akwizycji pomiarów w zależności do obserwowanego poziomu drgań. Rozwiązanie to pozwala na oszczędzanie energii w chwilach przestoju maszyny (brak lub niski poziom drgań), a jednocześnie na zwiększoną częstotliwość akwizycji danych podczas rejestrowania drgań powyżej pewnej predefiniowanej przez użytkownika wartości granicznej. Teoretycznie czujnik może być zaprogramowany w taki sposób, aby zwiększać częstotliwości pomiarów wraz z przekraczaniem kolejnych – coraz wyższych – poziomów drgań.

4.2 Stanowisko utrzymania ruchu

Czujniki wraz z nadajnikami stanowią źródło danych dla aplikacji monitorującej stan pracy urządzenia. Dane z czujników pobierane są z wykorzystaniem transceiverów radiowych. Transceivery pracują w sieci Ethernet w standardach 10Base-T lub 100Base-Tx.

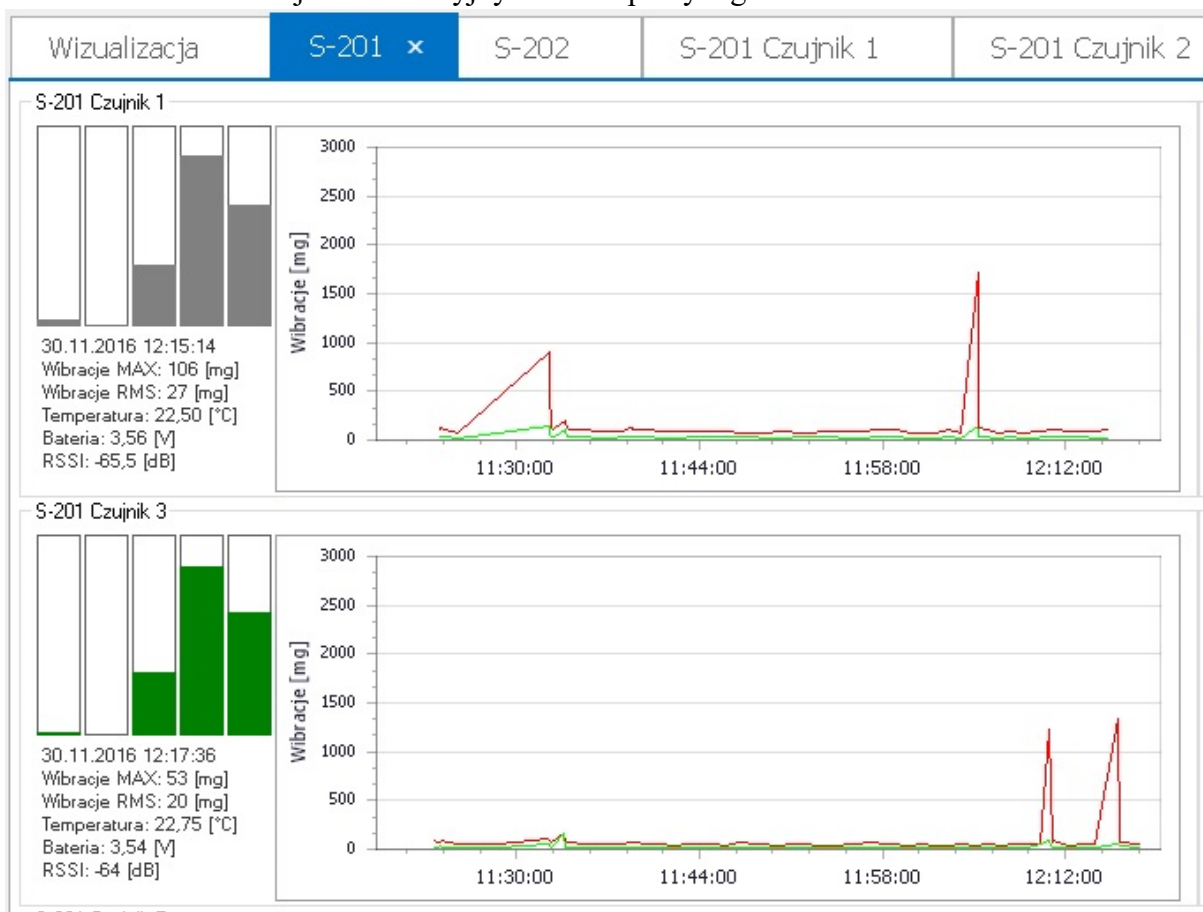
Ich podstawowym zadaniem jest odbiór danych pomiarowych z czujników będących w ich zasięgu. Dane te są uzupełniane o wskaźnik siły sygnału odbiornika i zapisywane w odpowiednich tabelach bazy danych.

Serwer bazy danych gromadzi dane pomiarowe oraz udostępnianie je aplikacji stanowiska utrzymania ruchu będącej programem typu SCADA oraz serwerowi środowiska R, w którym wykonywana jest analiza danych.

Aplikacja stanowiska utrzymania ruchu pozwala m.in. na:

- prezentację bieżących wartości drgań, temperatury i poziomu naładowania baterii,
- konfigurację i ustawianie prawidłowych, ostrzegawczych i alarmowych poziomów drgań (generalnie parametrów procedury diagnostycznej) oraz poziomów temperatury i naładowania baterii,
- prezentację danych bieżących i historycznych na wykresach (Rysunek 4),
- prezentację wybranych wyników analizy danych, wykonywanych przez analityczną część systemu,
- generowanie raportów okresowych (zmianowych, dobowych, długoterminowych).

Aplikacja umożliwi również prowadzenie dziennika awarii i prac remontowo-konserwatorskich. Jak już wspomniano, jest to bardzo ważna cecha systemu pozwalająca na wykorzystanie informacji zawartych w dzienniku podczas analizy danych. W szczególności, informacja o wymianie dowolnego z monitorowanych elementów suwnicy powoduje zresetowanie informacji o bezawaryjnym czasie pracy tego elementu.



Rysunek 4. Fragment okna wizualizacji pomiarów dla grupy czujników – widoczne są bieżące pomiary (wykres słupkowy) oraz pomiary historyczne (na rysunku pomiary z ostatniej godziny).

5. Procedura diagnostyczna

5.1 Wstępne przetwarzanie danych

Dwie suwnice były monitorowane za pomocą zestawu sześciu czujników każda. Do analizy wykorzystano informację o zarejestrowanych wartościach drgań – maksymalnej (VibrMAX) oraz skutecznej (VibrRMS).

Pierwszy etap przetwarzania danych polegał na przygotowaniu dwóch zbiorów danych (po jednym dla każdej suwnicy), w których każdy kolejny wiersz zawiera informacje o maksymalnym i skutecznym poziomie drgań rejestrowanych przez każdy z 6 czujników w kolejnych sekundach (Tabela 2).

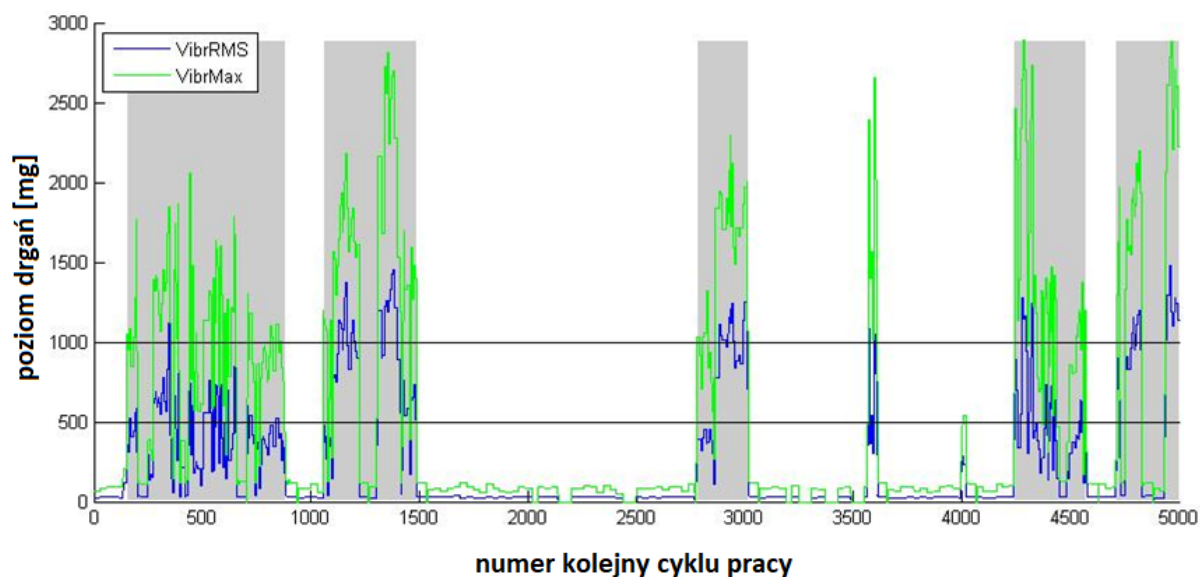
Data/czas	VibrRMS1	...	VibrRMS12	VibrMAX1	...	VibrMAX12
2017-05-05 15:12:00	28	...	29	71	...	74
2017-05-05 15:12:01	28	...	30	70	...	72

Tabela 2. Zbiór danych podstawowych opisujących pracę każdej z suwnic.

W sytuacji, w której z danego czujnika w danej sekundzie nie odnotowano pomiarów, a przerwa w danych wynosiła mniej niż 30 sekund, brakujące dane uzupełniano ostatnią z zarejestrowanych wartości. Okres 30 sekund wynikał z konfiguracji transmisji, w której wymuszano przesyłanie danych z czujników nie rzadziej niż 30 sekund. Przerwy dłuższe niż 120 sekund traktowano jako braki w danych.

Procedura diagnostyczna bazuje na analizie wektora zmiennych, który opisuje pojedynczy cykl pracy suwnicy. Cykl pracy powinien odzwierciedlać działanie suwnicy polegające na podniesieniu przenoszonego elementu przemieszczeniu go w inne miejsce i jego opuszczeniu. Ponieważ nie dysponowano informacjami o pracy tych elementów, które odpowiadają za podnoszenie i przemieszczanie się suwnicy, cykl zdefiniowano jako okres czasu, w którym czujniki rejestrowały podwyższone poziomy drgań. Ponadto, w celu identyfikacji cykli pracy przyjęto następujące dodatkowe założenia:

- podstawą identyfikacji cykli były pomiary, dla których zarejestrowana wartość skuteczna drgań przekraczała 150 mg; wartości niższe traktowane były jako przerwa w pracy suwnicy,
- zidentyfikowane cykle o długości krótszej niż 70 sekund nie były brane pod uwagę,
- jeśli przerwa pracy trwała mniej 60 sekund, dwa kolejne cykle były łączone.



Rysunek 5. Przykład identyfikacji cykli pracy suwnicy – obszary szare oznaczają zidentyfikowane cykle pracy.

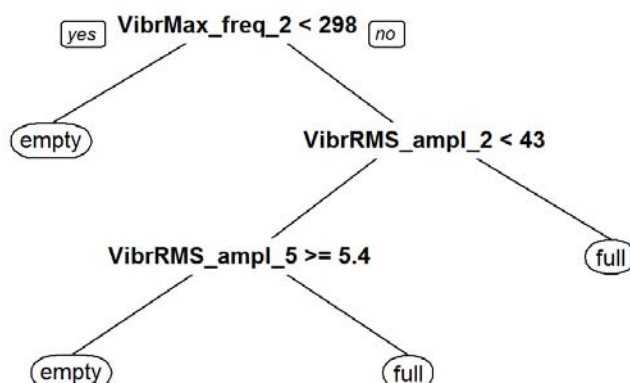
Dla każdego ze zidentyfikowanych cykli pracy obliczono szereg parametrów opisujących charakterystyki przebiegów zmiennych VibrMAX oraz VibrRMS. Obliczeń dokonano w całym zakresie rejestrowanych wartości oraz dla odfiltrowanych wartości tych cech w przedziałach 2000-2500mg, 2500-3000mg, 3000-3500mg. Dla VibrMAX i VibrRMS wyznaczano m.in.:

- wartość minimalną,
- wartość średnią i jej piąty (ozn. P5) oraz dziewięćdziesiąty piąty (ozn. P95) percentyl,
- liczbę pomiarów powyżej 3500mg,
- wyniki analizy harmonicznej sygnału wartości skutecznej drgań: częstotliwość 10-ciu pierwszych składowych harmonicznym (łącznie ze składową stałą) oraz ich amplitudę,
- wyniki analizy harmonicznej sygnału wartości maksymalnej drgań: częstotliwość 10-ciu pierwszych składowych harmonicznym (łącznie ze składową stałą) oraz ich amplitudę,
- pierwszy kwartyl (ozn. Q1),
- medianę (ozn. Q2),
- trzeci kwartyl (ozn. Q3),
- wartość maksymalną,
- rozstęp międzykwartyłowy (Q3-Q1),
- rozstęp percentylowy (P95-P5),
- modę zarejestrowanych wartości.

Efektem końcowym przeprowadzonej analizy był, dla każdego czujnika, wektor 115 cech charakteryzujących każdy cykl pracy suwnicy.

Pierwsza z wykonanych analiz polegała na sprawdzeniu czy na podstawie powyższych parametrów da się jednoznacznie rozpoznawać cykle pracy, w których suwnica obciążona jest ciężarem pełnej kadzi. Do badań dysponowano bardzo ograniczonym zbiorem treningowym składającym się z 48 przejazdów suwnicy, które zostały przez obsługę

kwalifikowane jako „przejazd pełny” (24 przykłady), „przejazd pusty” (24 przykłady). Na podstawie dostępnych przykładów wygenerowano – stosując algorytm RPART [24] – drzewo decyzyjne załączone na Rysunku 6.



Rysunek 6. Drzewo decyzyjne do identyfikacji pełnych i pustych przejazdów suwnicy.

Cechy bazujące na analizie Fouriera pozwoliły na uzyskanie drzewa o zdolności klasyfikacji wynoszącej odpowiednio: dokładność klasy empty 0,792 oraz dokładność klasy full 0,958. Niestety, po uruchomieniu klasyfikatora na danych gromadzonych przez dłuższy okres czasu zaobserwowano, że większość przykładów (5467 z 6439) została zaklasyfikowana jako empty). Pomimo tego, że przykłady nie posiadały etykiet klas, taki wynik klasyfikacji uznano za zły, gdyż ze specyfiki pracy suwnicy rozkład przykładów powinien być zbliżonych do równomiernego. Ostatecznie, dalszej analizie podawano cykle pracy suwnicy bez rozgraniczania czy oznaczają one przejazd pusty czy pełny.

W dalszej części badań do określenia procedury diagnostycznej użyto danych z jednej suwnicy, dane z drugiej suwnicy wykorzystano do weryfikacji przeprowadzonych badań.

W celu identyfikacji cech mających największe znaczenie diagnostyczne, zastosowano metodę selekcji cech bazującą na rankingu cech klasyfikatora utworzonego za pomocą metody lasów losowych [4]. Wektor kolejnych cykli z okresu 4 miesięcy pracy suwnicy (w sumie 11 818 cykli) poetykietowano w ten sposób, że cykлом jakie zarejestrowano w okresie do dwóch tygodniu bezpośrednio przed awarią i po jej usunięciu nadano etykietę 0 (suwnica sprawna), a cykлом jakie zarejestrowano w okresie dwóch tygodni przed awarią aż do wystąpienia awarii nadano etykietę 1 (suwnica w stanie przedawaryjnym). Uzyskano w ten sposób zbiór, w którym 9275 przykładów wskazywało na klasę 0 i 2543 przykłady wskazywały na klasę 1. Na przygotowanym – dla każdego czujnika drgań oddzielnie – zbiorze danych trenowano klasyfikator złożony z 1000 drzew decyzyjnych. Głównym kryterium podziału i oceny węzła było kryterium Gini [4]. Uzyskano następującą jakość klasyfikacji:

- czujnik 1 – specyficzność 0,984, czułość 0,898,
- czujnik 2 – specyficzność 0,991, czułość 0,722,
- czujnik 3 – specyficzność 0,986, czułość 0,828.

Na podstawie analizy drzew tworzących las losowy oceniano istotność każdej z rozważanych cech z punktu widzenia jej ważności w utworzonym klasyfikatorze. Ważność cechy X na podstawie utworzonego lasu losowego została wyznaczona według wzoru:

$$Imp(X) = \frac{1}{M} \sum_T \sum_{t \in T: v(t)=X} \frac{N_t}{N} \cdot \{G(t) - [\frac{N_{tL}}{N_t} G(t_L) + \frac{N_{tR}}{N_t} G(t_R)]\} \quad (1)$$

gdzie:

- M – liczba wszystkich drzew T w lesie losowym (w tym przypadku 1000),
- t – węzeł drzewa T ,
- t_L, t_R – lewy i prawy potomek węzła t ,
- $v(t)$ – cecha pojawiająca się w warunku węzła t ,
- N – liczba wszystkich obserwacji w zbiorze treningowym (w tym przypadku 11818),
- N_t – liczba obserwacji w węźle t ,
- $G(t)$ – indeks Giniego dla węzła t ; $G(t) = 1 - \frac{N_t^+}{N_t} - \frac{N_t^-}{N_t}$, gdzie N_t^+ i N_t^- to odpowiednio liczba przykładów pozytywnych (klasa 1) i negatywnych (klasa 0) w węźle t .

Im wyższa wartość miary (1), tym cecha opisująca cykl pracy suwnicy lepiej rozróżnia stany diagnostyczne, a tym samym jest bardziej pożądana jako cecha diagnostyczna. Jeżeli cecha nie występowała w żadnym z drzew tworzących las losowy, jej ważność wynosiła 0.

Rankingi cech według miary (1) zostały utworzone dla każdego z czujników z osobna. Uzyskano w ten sposób 3 rankingi cech. Ostateczna ranga danej cechy była średnią arytmetyczną pozycji, jaką cecha zajmowała w każdym z tych rankingów.

Pierwsze pięć cech w rankingu wykorzystano do dalszych prac nad opracowaniem procedury diagnostycznej. Cechami tymi były:

- VibrMax2000_Q3 – wartość 3 kwartyła cechy VibrMAX; w obliczeniach uwzględniono jedynie wartości $\text{VibrMAX} > 2000$,
 - VibrMax3000_Q3 – analogicznie jak wyżej,
 - VibrMax2500_Q3 – analogicznie jak wyżej
 - VibrMax_P95 – wartość 95 centyla cechy VibrMAX;
- VibrMax2000_P95 – wartość 95 centyla cechy VibrMAX; w obliczeniach uwzględniono jedynie wartości $\text{VibrMAX} > 2000$.

5.2 Analiza trendu

Podstawą procedury diagnostycznej jest analiza trendu zmian wartości cech (nazwijmy je zmiennymi diagnostycznymi) zidentyfikowanych w poprzednim podrozdziale jako kluczowe. Analiza trendu wykonywana jest jednocześnie na podstawie danych historycznych dla $h1$, $h2$, $h3$ cykli pracy suwnicy. Przy czym $h1$ opisuje krótki okres czasu, a $h2=2h1$, $h3=3h1$. Pozwala to na wychwycenie dynamicznych (ale być może krótkotrwałych), jak również stałych tendencji zmian w analizowanym szeregu czasowym.

W procedurze uwzględniane są również następujące parametry:

- stopień wygładzania (ozn. sm) – ze względu na bardzo dużą wariancję wartości zmiennych diagnostycznych, przed wykonaniem analizy trendu wartości są wygładzane średnią ruchomą uwzględniającą 100 wcześniejszych wartości (100 cykli pracy suwnicy),
- graniczny poziom wartości zmiennej diagnostycznej (ozn. cvl) – poziom ten jest poziomem odniesienia pozwalającym na estymację liczby cykli pracy suwnicy pozostałych do przekroczenia tego poziomu; w przypadku badania wzrostu wartości zmiennej diagnostycznej poziom ten nie musi być utożsamiany z awarią suwnicy.

Ekstrapolacja trendu pozwala na oszacowanie liczby cykli pozostałych do przekroczenia poziomu cvl . Zamiast liczbą cykli, można posługiwać się liczbą dni za jaką zostanie przekroczony poziom cvl , w tym celu przyjmuje się, że ustalana jest (arbitralnie) lub obliczana (na podstawie danych historycznych) średnia dzienna liczba cykli pracy (ozn. awc), która jest ekwiwalentem jednego dnia pracy suwnicy. Wartość ta może być modyfikowana w miarę gromadzenia informacji o pracy konkretnej suwnicy.

Niech S oznacza szereg czasowy kolejnych wartości zmiennej diagnostycznej w dziedzinie cykli pracy. Niech S_{sm} oznacza szereg czasowy wartości S wygładzony za pomocą średniej ruchomej z ostatnich sm wartości S . Analiza trendu liniowego w szeregu S_{sm} , którym do estymacji parametrów regresji wykorzystano hi ($i \in \{1, 2, 3\}$) ostatnich wartości szeregu S_{sm} prowadzi do uzyskania modelu postaci:

$$\hat{S}_{sm,h}(i) = Ai + B \quad (2)$$

gdzie: i to numer cyklu pracy suwnicy, A i B to parametry modelu estymowane na podstawie h ostatnich wartości szeregu S_{sm} .

Oznaczając przez $\hat{S}_{sm,h}(i)$ aktualną wartość modelu (2), liczbę cykli pracy pozostałych do przekroczenia wartości progowej cvl obliczamy według wzoru:

$$\Delta i = \begin{cases} \frac{cvl - \hat{S}_{sm,h}(i) - B}{A} & A \neq 0 \\ \infty & A = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Przyjmując, że średnia dzienna liczba cykli pracy suwnicy wynosi awc , możliwe jest określenie liczby dni pracy suwnicy, po której wartość rozważanej zmiennej diagnostycznej przekroczy poziom cvl . Wartości wskaźnika (3) można pogrupować tak, aby ich interpretacja była łatwiej zrozumiała dla końcowego użytkownika. Uzyskamy w ten sposób meta-wskaźnik oznaczany jako Δi_+ , którego wartości interpretowane są w sposób następujący:

- $\Delta i_+ = 0$ wtedy i tylko wtedy, gdy $\Delta i < 0$ lub $\Delta i = \infty$ – odpowiada to sytuacji, gdy mamy do czynienia z trendem malejącym lub bocznym,
- $\Delta i_+ = 1$ wtedy i tylko wtedy, gdy $\Delta i \in [0, 1]$ – odpowiada to sytuacji, w której poziom cvl został przekroczony lub zostanie przekroczony za mniej niż awc cykli pracy suwnicy,
- $\Delta i_+ = (\frac{1}{awc})\Delta i$ w pozostałych przypadkach.

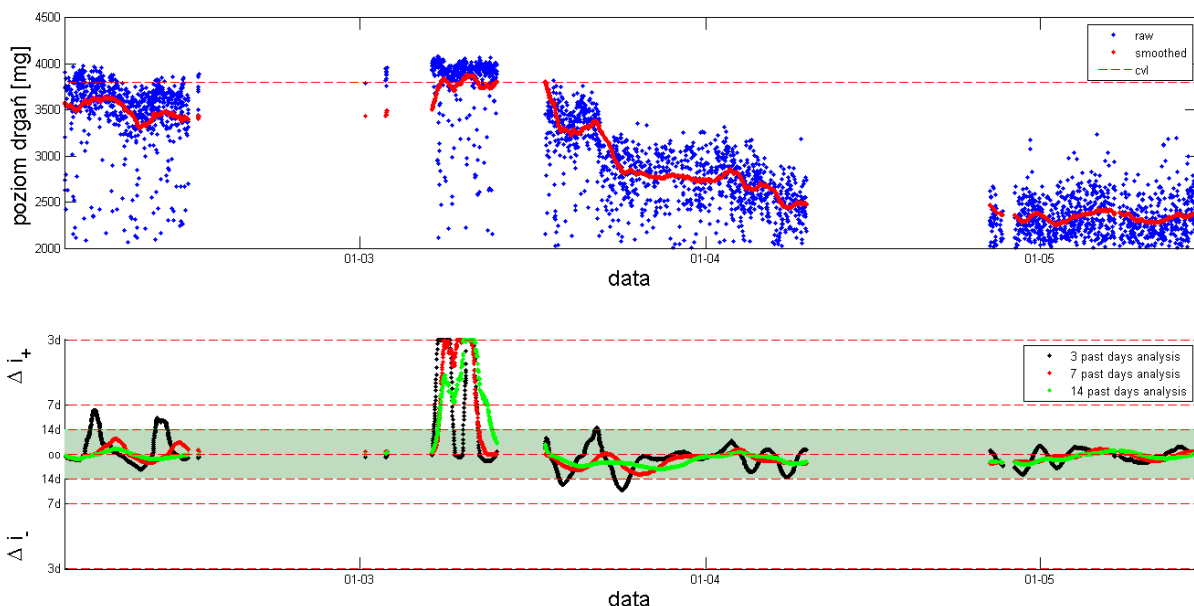
Ze względu na sposób zdefiniowania Δi_+ wskaźnik ten nie odzwierciedla spadku wartości zmiennej diagnostycznej. Dokładniej, w przypadku trendu bocznego lub malejącego wartość $\Delta i_+ = 0$, w szczególności będzie tak w sytuacji, gdy wartości badanej zmiennej ustabilizują się na jakimś poziomie (również na poziomie $>cvl$).

Meta-wskaźnik Δi_- pozwala wskazać przedziały czasu, w których mamy do czynienia z malejącym trendem monitorowanej wartości. Wartość progową dla tego wskaźnika ustalono na 0. Inne rozwiązanie to ustalenie tej wartości jako średniego poziomu drgań w okresie, w którym mamy pewność, że suwnica była sprawna. Interpretacja Δi_- – po modyfikacji wzoru (3) polegającej na zamianie wartości cvl wartością nvl – jest następująca:

- $\Delta i_- = 0$ wtedy i tylko wtedy, gdy $\Delta i < 0$ lub $\Delta i = \infty$ – odpowiada to sytuacji, gdy mamy do czynienia z trendem rosnącym lub bocznym,

- $\Delta i_- = 1$ wtedy i tylko wtedy, gdy $\Delta i \in [0,1]$ – odpowiada to sytuacji, w której poziom 0 został osiągnięty lub zostanie osiągnięty za mniej niż awc cykli pracy suwnicy,
- $\Delta i_- = (\frac{1}{awc})\Delta i$ w pozostałych przypadkach.

Wartości Δi_+ oraz Δi_- można wizualizować na wykresie. Wracając do analizowanego zbioru danych, w pierwszej połowie lutego obserwujemy dwa momenty znaczącego pogarszania się stanu diagnostycznego urządzenia (analizę przeprowadzono dla $hl=7$ dni, $awc=40$, $cvl=4000$). Analizując wykres Δi_+ , pierwszy z nich osiąga maksimum wskazujące na niecałe 7 dni pozostałych do przekroczenia dopuszczalnego poziomu wartości zmiennej diagnostycznej, a w przypadku drugim jest to około 10 dni. Widać to szczególnie na wykresach trendów budowanych na podstawie analizy ostatnich 3 (kolor czarny) i 7 (kolor czerwony) dni pracy suwnicy. Z kolei wykres Δi_- nie pokazuje znaczącej poprawy stanu diagnostycznego pomiędzy tymi okresami, chociaż analiza wygładzonego przebiegu zmiennej diagnostycznej (rys. 7, wykres górny) uwidacznia drobny chwilowy spadek wartości zmiennej diagnostycznej.



Rysunek 7. Wykres monitorowania wartości VibrMax2000_Q3 – suwnica 1. Wykres górny: wartości oryginalne (niebieski), wartości wygładzone (czerwony) oraz poziom cvl . Wykres dolny: wartości wskaźnika Δi generowane na podstawie analizy trendu wykonanej w oparciu o 3, 7 i 14 poprzednich dni pracy suwnicy.

Na wykresie dolnym Rysunku 7 – ze względu na jego czytelność – oś Y obcięto do wartości odpowiadającej 3 dniom do przekroczenia cvl . Ponadto, jako wartość nvl przyjęto wartość 0, co obniża granice progów ostrzegawczych i alarmowych, a tym samym zawyża wartości umieszczone w raporcie.

W rozważanym okresie, w dzienniku napraw nie odnotowano żadnych informacji na temat podjętych działań naprawczych – zapisano jednak, że operator odnotowuje podwyższony poziom drgań. Przerwa w danych pomiarowych wynika z przerwy pracy suwnicy, następnie około 10 marca suwnica ponownie pracowała, ale jak widać w zasadzie do początku jej użytkowania wskaźnik Δi_+ osiągnął bardzo szybko wartość graniczną, co potwierdza podążający za zwiększającymi się wartościami wskaźnika Δi_+ zwiększający się poziom drgań. Następnie suwnica przeszła kilkudniowy remont i ponownie została oddana do użytkowania. Fakt wykonania remontu znajduje odzwierciedlenia w spadku wartości Δi_+

i wzroście wartości Δi_- , a następnie stabilizacji trendów 7 i 14-dniowych wartości wskaźnika Δi_+ .

Interpretację zmian wartości wskaźników Δi_+ oraz Δi_- oraz wartości zmiennej diagnostycznej na podstawie, której wskaźniki te są obliczane można umieścić w raporcie, którego przykład zamieszczono w Tabeli 3.

Wartości umieszczane w raporcie wyznaczane są według następujących zasad:

- OK! jeśli wskaźnik Δi_+ jest równy 0 oraz wartości zmiennej diagnostycznej są poniżej poziomu $cvl/0,7$; dodatkowo jeśli trend jest rosnący, to podawana jest liczba „dni” za jakie zostanie przekroczony poziom cvl o ile liczba ta jest mniejsza od 35;
- W jeśli Δi_+ jest równy 0 oraz wartości zmiennej diagnostycznej w przedziale $(cvl/0,7, cvl/0,8]$; dodatkowo jeśli trend jest rosnący, to podawana jest liczba „dni” za jakie zostanie przekroczony poziom cvl o ile liczba ta jest mniejsza od 28; jeśli liczba ta jest większa od 28, podawana jest jedynie informacja o kierunku trendu,
- A jeśli wartości zmiennej diagnostycznej są powyżej poziomu $cvl/0,8$; dodatkowo jeśli trend jest rosnący, to podawana jest liczba „dni” za jakie zostanie przekroczony poziom cvl o ile liczba ta jest mniejsza od 21; jeśli liczba ta jest większa od 21, podawana jest jedynie informacja o kierunku trendu.

Dla przypomnienia, 1 „dzień” to średnia liczba uruchomień suwnicy w trakcie dnia, wartość ta może być ustalona arbitralnie albo może zostać obliczona na podstawie historii cykli pracy suwnicy.

Suwnica SW1 trendy zmian wartości Δi_+				
Zmienna diagnostyczna Vibr_Max2000_Q3	Analiza trendu na podstawie ostatnich:			
Data	3 dni	7 dni	14 dni	Zgodnych
2017-02-04	A (8)	A(↑)	A (↑)	3
2017-02-05	A (10)	A(↑)	A(↑)	3
...	
2017-02-08	A(↓)	A(↑)	A(↑)	2
...
2017-03-24	W(↓)	W(↓)	W(↓)	3
...	
2017-05-09	OK!	OK!	OK!	3

Tabela 3. Raport diagnostyczny trendów wartości zmiennej diagnostycznej opisującej poziom drgań w poszczególnych cyklach pracy suwnicy (suwnica 1).

Ostatnia kolumna raportu zawiera liczbę jednakowych decyzji dla analiz trendu przeprowadzonych na podstawie ostatnich 3, 7 i 14 „dni”. Kolumna ta pozwala na śledzenie stabilności zmian wartości zmiennej diagnostycznej.

W miarę potrzeb użytkownika raport może dotyczyć jednego lub większej liczby czujników, a także większej liczby zmiennych diagnostycznych.

Raport nie podaje w sposób jednoznaczny sugestii dotyczących czasu, w jakim wystąpi awaria lub konieczność remontu suwnicy. Pozwala natomiast w uporządkowany sposób obserwować trendy zmian cechy (lub cech) zidentyfikowanych jako zmienne diagnostyczne.

5.3 Faza wdrożeniowa

Praktyczne wykorzystanie przedstawionej powyżej metody wymaga:

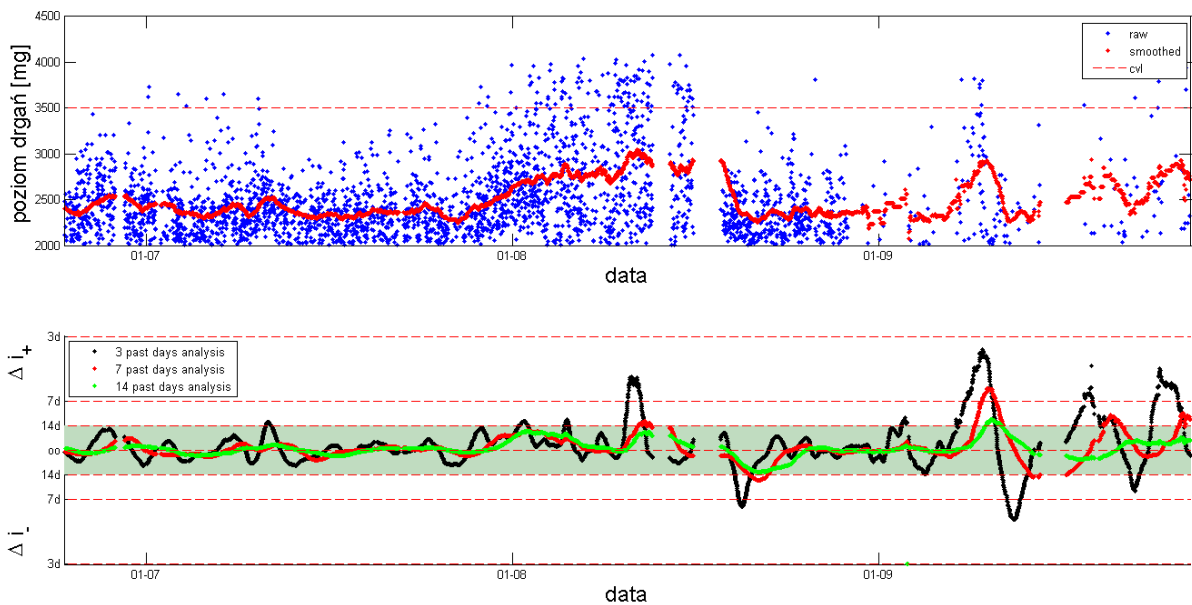
- rozmieszczenia czujników na monitorowanej suwnicy,
- identyfikacji cykli pracy suwnicy zgodnie z metodą przedstawioną na początku sekcji 5,2,
- obliczenia dla każdego z czujników wartość cechy $VibrMax2000_Q3$ i ew. kolejnych cech z rankingu zamieszczonego w sekcji 5,2,
- ustaleniu wartości cvl , awc ,
- cyklicznym – raz na dobę – obliczaniu wartości wskaźników Δi_+ , Δi_- ; podczas obliczania wartości tych wskaźników wartości parametrów sm i hl ustawione są odpowiednio na 100 i $7awc$
- generowaniu wykresów wartości Δi_+ , Δi_- oraz raportu przedstawionego w Tabeli 3.

Z praktycznego punktu widzenia należy również doprecyzować warunki postępowania w przypadku: wykonania prac remontowych (czy historia wartości zmiennej diagnostycznej ma zostać wyzerowana?) oraz pracy suwnicy na tzw. biegu rozruchowym. Zdarzają się często sytuacje, w których suwnica pomimo tego, że nie powinna już być użytkowana, jest użytkowana w trybie biegu rozruchowego – w takich sytuacjach poziom drgań jest znacząco niższy.

6. Badanie weryfikacyjne

Badania weryfikacyjne przeprowadzono na drugiej identycznej suwnicy, pracującej w tym samym zakładzie hutniczym. Z dziennika remontów wynikało, że suwnica ta przechodziła remont w okresie 16-18.08.2017. Przy czym remont ten został wykonany nieprawidłowo i suwnica w krótkim czasie musiała przechodzić kolejny remont polegający na wymianie układu zębniaka (remont ten wykonano w październiku). W okresie od początku września do terminu drugiego remontu suwnica pracowała zdecydowanie rzadziej niż w sytuacji jej pełnej sprawności.

Na rysunku 8 przedstawiono oryginalne i wygładzone wartości zmiennej diagnostycznej $VibrMax_Q3$ oraz wartości wskaźników Δi_+ i Δi_- . W tabeli 4 przedstawiono raport dla kilku początkowych dni sierpnia. Warto dodać, że dwa tygodnie przed remontem suwnicy pracowała ona jedynie na biegu rozruchowym – co osłabiło nieco dynamikę wzrostu poziomu drgań. Jest to widoczne na wykresie wartości zmiennej diagnostycznej $VibrMax2000_Q3$.



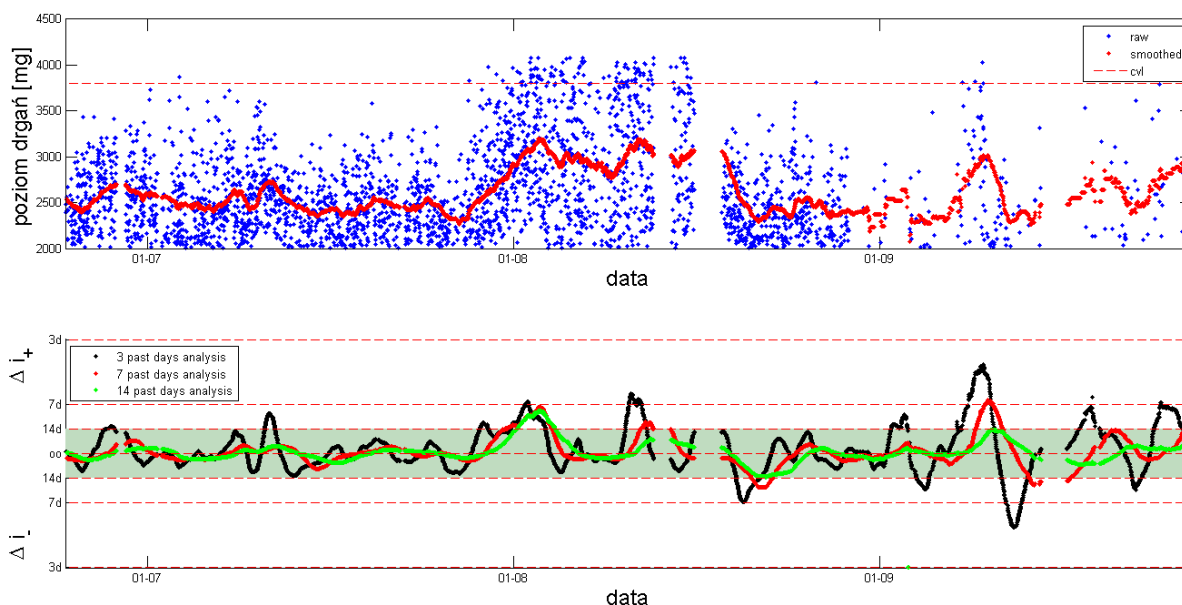
vibration level [mg]
date

Rysunek 8. Wykres monitorowania wartości VibrMax2000_Q3 – suwnica 2. Wykres górny: wartości oryginalne (niebieski), wartości wygładzone (czerwony) oraz poziom cvl. Wykres dolny: wartości wskaźnika ΔI generowane na podstawie analizy trendu wykonanej w oparciu o 3, 7 i 14 poprzednich dni pracy suwnicy.

Suwnica SW2 trendy zmian wartości ΔI_{\pm}				
Zmienna diagnostyczna Vibr_Max2000_Q3	Analiza trendu na podstawie ostatnich:			
Data	3 dni	7 dni	14 dni	Zgodnych
2017-07-25	OK!	OK!	OK!	3
...
2017-08-07	W(↓)	W(↑)	W(↑)	2
...
2017-08-11	A(5)	A(20)	A(↑)	3

Tabela 4. Raport diagnostyczny trendów wartości zmiennej diagnostycznej opisującej poziom drgań w poszczególnych cyklach pracy suwnicy (suwnica 2).

Na rysunku 9 przedstawiono również wykres zmiennej diagnostycznej VibrMax2000_P95, jest to ostatnia ze zmiennych istotnych zidentyfikowanych w podrozdziale 5.2.



Rysunek 9. Wykres monitorowania wartości VibrMax2000_P95 – suwnica 2. Wykres górny: wartości oryginalne (niebieski), wartości wygładzone (czerwony) oraz poziom *cvl*. Wykres dolny: wartości wskaźnika Δi generowane na podstawie analizy trendów wykonanej w oparciu o 3, 7, 14 poprzednich dni pracy suwnicy.

Zmienna ta bardzo dobrze obrazuje proces pogarszania się stanu suwnicy, gdyż wyraźne trendy wzrostowe obserwowane są w początkowym okresie sierpnia – wtedy, gdy suwnica pracowała jeszcze w normalnych warunkach (na biegu roboczym zamiast rozruchowego). Następnie – pomimo obniżenia biegu pracy – prawidłowo prognozowany jest moment, w którym konieczne było wykonanie remontu. Po nieprawidłowo wykonanym remoncie również sygnalizowane są nieprawidłowości w pracy urządzenia.

Przykład ten obrazuje jak istotne jest generowanie wykresów i raportów diagnostycznych dla wszystkich zidentyfikowanych w rozdziale 5.2 pięciu zmiennych diagnostycznych, dla wszystkich monitorowanych czujników. Z praktycznego punktu widzenia analiza i interpretacja tak dużej liczby wykresów i raportów jest – w wykonaniu dyspozytora – niemożliwa, dlatego rekomendacje dotyczące tego, którą zmienną diagnostyczną i jakie poziomy drgań *cvl* i *nvl* mają być podstawą do generowania raportu powinny być wypracowywane przez analityka danych. Praca taka jest coraz częściej realizowana jako usługa utrzymania systemu wspomagania decyzji przez działy data science firm dostarczających tego typu systemy.

7. Podsumowanie i wnioski

Monitorowanie i diagnostyka urządzeń technicznych jest zadaniem niełatwym, wymagającym każdorazowo indywidualnego podejścia do analizowanego obiektu.

W artykule przedstawiono system monitorowania drgań wykorzystujący sieć bezprzewodowych czujników. Przedstawiono także zastosowanie pomiarów gromadzonych przez czujniki do monitorowania stanu diagnostycznego suwnic bramowych.

W szczególności, w drugiej części artykułu przedstawiono metodę pozwalającą na analizę trendów zmian poziomu drgań i powiązanie tego poziomu z pogarszającym się stanem suwnicy. Przedstawiono także wymagania dotyczące praktycznego stosowania metody. Ze względu na brak możliwości symulowania różnego rodzaju uszkodzeń i awarii, metodyka diagnostyki jest stosunkowo prosta, bazuje ona na założeniu, że o pogarszającym

się stanie suwnicy świadczy zwiększający się poziom drgań (co jest zgodne z intuicją operatorów tych urządzeń). Kluczowymi problemami dla procedury diagnostycznej są: proces identyfikacji cykli pracy, identyfikacja statystyki najlepiej odzwierciedlającej wpływ poziomu drgań na stan urządzenia oraz analiza trendów (krótko i średnioterminowych) zmian wartości tej statystyki. W artykule przedstawiono sposoby rozwiązania tych problemów, zaproponowano także budowę raport diagnostycznego prezentowanego dyspozytorowi utrzymania ruchu.

Zaprezentowany system pomiarowy wdrożono w zakładzie hutniczym na terenie Górnego Śląska.

Dalsze prace polegać będą na zastosowaniu systemu do monitorowania i diagnostyki innych urządzeń – planowane jest monitorowanie drgań krążników, po których przesuwa się taśma przenośnika transportowego. W celu wdrożenia konieczne będzie opracowanie nowej procedury diagnostycznej dedykowanej do tego typu zagadnienia, pozostałe części systemu (hardware i software – część monitorująca) są gotowe do zastosowania na dowolnym obiekcie.

Opracowany system jest w znacznym stopniu zgodny z architekturą i zasadami działania tzw. szkieletowych – bazujących na danych (ang. data driven) – systemów wspomagania decyzji. W systemach tych modele diagnostyczne tworzone są dla konkretnych potrzeb na podstawie analizy danych historycznych. Natomiast moduły akwizycji, przechowywania i wizualizacji danych są modułami gotowymi do użycia.

Finansowanie

Praca została częściowo wykonana w ramach prac statutowych Instytutu Informatyki BK-213/RAU2/2018. Udział drugiego autora sfinansowano ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (umowa numer 10/DW/201701/1).

Literatura

1. Antoni J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2006; 20(2):282-307.
2. Bartelmus W, Zimroz R. Vibration condition monitoring of planetary gearbox under varying external load. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2008; 23:246-257.
3. Bartelmus W, Zimroz R. A new feature for monitoring the condition of gearboxes in non-stationary operating conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2009; 23(5):1528-1534.
4. Breiman L. Random forests. *Machine Learning* 2001; 45(1):5-32.
5. Chen B, Yin P, Gao Y, Peng F. Use of the correlated EEMD and time-spectral kurtosis for bearing defect detection under large speed variation. *Mechanism and Machine Theory* 2018; 129:162-174.
6. Du W, Li A, Ye P, Liu C. Fault diagnosis of plunger pump in truck crane based on relevance vector machine with particle swarm optimization algorithm. *Shock and Vibration* 2013; 20(4):781-792.
7. Elforjani M, Bechhoefer E. Analysis of extremely modulated faulty wind turbine data using spectral kurtosis and signal intensity estimator. *Renewable Energy* 2018; 127:258:268.
8. Głowacz A, Głowacz W. Vibration-Based Fault Diagnosis of Commutator Motor. *Shock and Vibration* 2018; art. id 7460419.
9. Głowacz A, Głowacz Z. Diagnosis of the three-phase induction motor using thermal imaging. *Infrared Physics & Technology* 2017; 81: 7-16.

10. Henao H, Capolino G, Manes F. Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques. *IEEE industrial electronics magazine* 2014; 8(2): 31-42.
11. ISA95 – Enterprise-Control System Integration Standard (<https://www.isa.org/isa95/>)
12. Jingwei G, Niaoqin H, Lehua J, Jianyi F. A New Condition Monitoring and Fault Diagnosis Method of Engine Based on Spectrometric Oil Analysis. *Advances in Intelligent and Soft Computing* 2011, 110:117-124.
13. Korbicz J, Kościelny M (eds.). *Modeling, Diagnostics and Process Control. Implementation in the DiaSter System*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2011.
14. Korbicz J, Kościelny M, Kowalczyk Z, Cholewa W (eds.). *Fault Diagnosis. Models, Artificial Intelligence, Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004.
15. Li Y, Liang X, Xu M, Huang W. Early fault feature extraction of rolling bearing based on ICD and tunable Q-factor wavelet transform. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2017, 86(Part A):204-223.
16. Macián V, Tormos B, Olmeda P, Montoro L. Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis. *Tribology International* 2003; 36:771–776.
17. Mazurkiewicz, D. Computer-aided maintenance and reliability management systems for conveyor belts. *Eksplotacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability* 2014; 16(3):377-382.
18. Mobley R. *An Introduction to Predictive Maintenance*. Second Edition. Butterworth-Heinemann 2013.
19. Peng Z, Chu F. Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2004; 18(2):199-221
20. Przystałka P, Moczulski W. Methodology of neural modelling in fault detection with the use of chaos engineering. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2015; 41:25-40.
21. R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2014, <http://www.R-project.org>
22. Samuel P, Pines D. A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics. *Journal of Sound and Vibration* 2005; 282(1-2):475-508.
23. Silva S, Costa P, Gouvea M, Lacerda A, Alves F, Leite D. High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network. *Electric Power Systems Research* 2018, 154:474-483.
24. Therneau T, Atkinson B. Package: rpart (<http://cran.r-project.org/web/packages/rpart/rpart.pdf>)
25. Wachla D, Moczulski W. Identification of dynamic diagnostic models with the use of methodology of knowledge discovery in databases. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 2007; 20(5):699-707.
26. Wu S, Zuo M. Linear and Nonlinear Preventive Maintenance Models. *IEEE Transactions on Reliability* 2010; 59(1):242-249.
27. Yan R, Gaob R, Chen X. Wavelets for fault diagnosis of rotary machines: A review with applications. *Signal Processing* 2014; 96(A):1-15.
28. Ye Z, Wu B, Zargari N.: Online mechanical fault diagnostics of induction motor by wavelet artificial neural network using stator current. *IECON Proceedings* 2000; 2:1183–1188.
29. Zio E. Some challenges and opportunities in reliability engineering. *IEEE Transactions on Reliability* 2016; 65(4):1769-1782.