



# PORTFOLIO: Inteligentny system zintegrowanej automatycznej analizy sygnałów z maszyn wirnikowych

*Autorzy: Tomasz Barszcz, Andrzej Bielecki, Marzen Bielecka, Mateusz Wójcik, Andrzej Rychlicki*

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
budynek C-2 pokój 426 tel: 12 617 44 53 [www.isi.agh.edu.pl](http://www.isi.agh.edu.pl) [isi@agh.edu.pl](mailto:isi@agh.edu.pl)



# Wprowadzenie

Maszyny wirnikowe są bardzo szeroką klasą maszyn, używaną w praktycznie wszystkich dziedzinach przemysłu, od energetyki, poprzez transport, przemysł spożywczy aż do napędów robotów i lotnictwa. Bezpieczeństwo i optymalna eksploatacja zależą od poprawności wykrywania uszkodzeń i śledzenia procesów degradacyjnych. Diagnostowanie systemów mechanicznych, zwłaszcza o skomplikowanej budowie, realizowane w czasie normalnej eksploatacji charakteryzującej się dużą zmiennością warunków eksploatacyjnych (obciążenia, prędkości obrotowe), jest zagadnieniem bardzo trudnym. W praktyce zdarzają się sytuacje, gdy nie są wykrywane nawet poważne awarie. Ze statystyk producentów turbin wiatrowych, podobnie jest w przypadku układów napędowych maszyn górniczych, wynika stosunkowo duża awaryjność tych elementów. Główną przyczyną tej sytuacji jest brak dostatecznego nadzoru nad ewolucją stanu technicznego.

Istniejące obecnie metody wykorzystują w ogromnej większości analizę sygnałów drgań mechanicznych, coraz częściej uzupełniane przez analizę tzw. parametrów procesowych. W ostatniej dekadzie opracowano wiele nowatorskich metod oceny stanu, często wykorzystujących narzędzia sztucznej inteligencji. W dalszym jednak ciągu do syntezy informacji i podjęcia decyzji niezbędna jest praca eksperta, który musi wziąć pod uwagę wyniki z licznych metod cząstkowych.

Coraz więcej maszyn jest objętych monitorowaniem, które prawie zawsze obejmuje również monitorowanie sygnałów drganiowych. Bardzo istotnym problemem jest silna zależność poziomu drgań od warunków w jakich pracuje maszyny (przede wszystkim prędkości obrotowej i mocy). W wielu przypadkach zmiany drgań wynikające z rozwijających się uszkodzeń są dużo mniejsze niż zmiany drgań wynikające ze zmian punktu pracy.

## Zdefiniowanie problemu

Celem niniejszego projektu jest opracowanie jednolitego, zintegrowanego systemu analizy sygnałów z maszyn wirnikowych. System taki, bazując na metodach sztucznej inteligencji, byłby w stanie przeprowadzić analizy cząstkowe (np. analiza stanu operacyjnego, walidacja danych, analiza fourierowska, analiza rzędów, cyklostacjonarna analiza modulacji, itp.). Następnie system wyznaczać będzie

zintegrowane wskaźniki stanu technicznego całej maszyny, jak również jej poszczególnych części składowych.

Projekt obejmuje opracowanie systemów bazujących na różnego typu systemach sztucznej inteligencji. Przewiduje się, przede wszystkim, użycie metod typu Machine Learning, jak też sztucznych sieci neuronowych i systemów wnioskowania rozmytego oraz metod statystycznych. Przewiduje się również analizę różnego typu maszyn: maszyn górniczych, turbin wiatrowych, kompresorów tłokowych, pomp i wentylatorów.

## Potencjalny rynek odbiorców zainteresowanych opracowanymi technologiami

Potencjalnymi nabywcami są wszystkie przedsiębiorstwa, które produkują lub eksploatują maszyny wirnikowe. Jest to ogromna grupa firm, obejmująca wiele gałęzi przemysłu. Zasadnicze typy podmiotów to:

- a) Producenci – z reguły są to duże przedsiębiorstwa, produkujące poszczególne maszyny wirnikowe (np. fabryka pomp, fabryka silników turbinowych) albo złożone systemy wykorzystujące takie maszyny (np. elektrownie konwencjonalne bądź wiatrowe, platformy wiertnicze, cementownie, samoloty, pociągi, pojazdy samochodowe)
- b) Właściciele – są to przedsiębiorstwa posiadające i eksploatujące złożone obiekty w których skład wchodzi maszyny wirnikowe
- c) Firmy remontowe – są to najczęściej poddostawcy firm właścicieli, którzy na ich zlecenie realizują kompleksowe usługi naprawczo – remontowe. Typowym przykładem mogą być zakłady remontowe energetyki, bądź firmy obsługujące farmy wiatrowe
- d) Specjalistyczne firmy konsultingowe – są to szybko rosnące w ostatnich latach z reguły niewielkie firmy oferujące usługi oparte na wiedzy, np. pomocy w problemach z uruchomieniem elektrowni.

## Uzyskane wyniki

Energetyka wiatrowa charakteryzuje się inną strukturą kosztów niż energetyka konwencjonalna. Relatywnie wysokie są koszty inwestycji, w porównaniu do kosztów podczas całego cyklu życia turbiny wiatrowej. Po uruchomieniu największym kosztem są wydatki na obsługę (w energetyce cieplnej jest to koszt paliwa). Z drugiej strony elektrownie wiatrowe są źródłami energii o statystycznie najwyższej dyspozycyjności – rzędu 98%. Aby utrzymać tak wysoki poziom dyspozycyjności konieczne jest odpowiednie planowanie przeglądów i remontów, dzięki czemu właściciel może odpowiednio wcześniej wymienić zużywającą się elementy. Częstym przykładem jest wymiana łożyska (o koszcie rzędu 1 tys. EUR), która zapobiegnie uszkodzeniu, a później wymianie np. przekładni (ok. 100 tys. EUR) lub generatora (ok. 50 tys. EUR). Dodatkowo, do przeprowadzenia takiego remontu potrzebne jest wynajęcie dźwigu, co jest również kosztem rzędu wielu tysięcy EUR (koszt ten jest znacznie wyższy dla turbin zainstalowanych na szelfie morskim).

W konsekwencji pojawiło się i szybko się zwiększa zapotrzebowanie na systemy monitorowania i diagnostyki turbin wiatrowych. Godny uwagi jest fakt, że zapotrzebowanie to spowodowane zostało nie – jak w przypadku dużych turbozespołów w energetyce konwencjonalnej – głównie kosztami utraconej produkcji, ale właśnie kosztami dodatkowej obsługi i remontów. Na szybki rozwój systemów monitorowania i diagnostyki miały również duży wpływ firmy ubezpieczeniowe.

Aby utrzymać wysoki poziom dyspozycyjności konieczne jest odpowiednie planowanie przeglądów i remontów. Jest to możliwe dzięki metodom ciągłej oceny stanu technicznego, powszechnie realizowanym poprzez instalowanie systemów ciągłego monitorowania stanu dynamicznego. Głównymi korzyściami z zastosowania wiedzy o stanie technicznym jest wzrost bezpieczeństwa, oraz – co jest szczególnie istotne dla turbin wiatrowych – podnoszenie dyspozycyjności oraz redukcja kosztów utrzymania ruchu. Dzięki nowoczesnym, coraz bardziej wiarygodnym metodom określania stanu technicznego urządzeń możliwe jest przejście od obsługi maszyn opartej na planie remontów (ang. preventive maintenance) do obsługi opartej na rzeczywistym stanie technicznym (ang. condition based maintenance). Zmiana ta oferuje znaczne korzyści, takie jak:

- obniżenie kosztów remontów – zakres i częstotliwość remontów dostosowuje się do rzeczywistych potrzeb;
- podniesienie poziomu bezpieczeństwa – obecnie mimo prowadzenia planowych remontów zdarzają się awarie; stosowanie metod oceny stanu pozwala na wczesne wykrycie niesprawności na wczesnym etapie jej rozwoju;

- następnie możliwe jest śledzenie rozwoju uszkodzenia i podjęcie decyzji co do remontu w momencie najlepszym z punktu widzenia eksploatacji
- podwyższenie dyspozycyjności – z uwagi na konieczność ciągłego podnoszenia jakości procesów wytwarzania energii. Awarie oraz spowodowane przez nie nieplanowane przestoje w pracy turbiny wiatrowej pociągają za sobą bardzo wysokie koszty; w tej sytuacji wiedza o rozwoju niesprawności maszyny pozwala na taki wybór momentu remontu (np. wymiany łożyska), który pozwoli na uniknięcie strat spowodowanych przestojem
- podniesienie wiedzy o maszynie – rozszerzony zakres pomiarów i śledzenia trendów w perspektywie kilku lat ma ogromne znaczenie dla wiedzy o rzeczywistej ewolucji stanu turbiny wiatrowej i koparek kołowych w trakcie jej eksploatacji; pozwala to z kolei na ulepszenia w projektowaniu kolejnych serii albo na wprowadzanie zmian w konstrukcji maszyny podczas remontów.

Przemysł coraz częściej uwzględnia korzyści wynikające z monitorowania i diagnostyki stanu technicznego, ponieważ korzyści mają znaczące konsekwencje finansowe, zarówno z punktu utrzymania ruchu, jak i remontów. Coraz więcej turbin wiatrowych jest wyposażanych w systemy monitorowania i diagnostyki, zwiększa się popyt i na systemy i na związane z nimi usługi, takie jak konfigurowanie systemów oraz interpretacja wyników. Szybki wzrost liczby zainstalowanych systemów monitorowania nastąpił po wprowadzeniu podwyższonych wymagań przez największe firmy ubezpieczeniowe (na rynku niemieckim, hiszpańskim i duńskim: Germanisher Lloyd, Allianz). Podobne systemy instalowane są również na innych grupach maszyn, np. maszynach pomocniczych w energetyce, takich jak młyny węglowe, wentylatory ciągu, pompy wody zasilającej, pompy wody chłodzącej itp.. Systemy monitorowania i diagnostyki coraz częściej pojawiają się również w innych dziedzinach przemysłu: petrochemia, transport lotniczy, transport kolejowy, poligrafia, cementownie i wiele, wiele innych. Równolegle następuje coraz większa profesjonalizacja eksploatacji, rozpowszechnia się świadomość konieczności stosowania diagnostyki oraz znajomość jej metod. Dużym powodzeniem cieszą się konferencje i szkolenia poświęcone tej tematyce.

Podsumowując, diagnostyka układów przeniesienia mocy z rotora do prądnicy należy do podstawowych problemów utrzymania w sprawności elektrowni wiatrowych. Wzrastająca liczba budowanych elektrowni wiatrowych w Polsce i zagranicą stawia zagadnienie diagnostyki elektrowni wiatrowych jako zagadnienie podstawowe, ponieważ dotychczasowe rozwiązania nie są wystarczające.

Trudnością w rozwiązaniu tego problemu jest zmienność obciążenia. Jednak wykorzystanie energii wiatru jest zgodne z tendencją ogólnoswiatową. Jednym z problemów jest zwiększenie niezawodności pracy elektrowni wiatrowych. Można to uzyskać poprzez monitorowanie stanu technicznego tych urządzeń. Elektrownie te są w większości przypadków wyposażone w systemy monitorujące będące podstawą do diagnostyki wibroakustycznej. Nie ma jednak odpowiedniej procedury oceny stanu technicznego, więc nie spełniają w pełni swego zadania. Zagadnienie to będzie rozwiązywane poprzez zastosowanie nowych metod estymacji sygnałów wibroakustycznych. Obok elektrowni wiatrowych uzyskuje się energię elektryczną z elektrowni opalanych węglem brunatnym. Do wydobywania węgla wykorzystuje się koparki kołowe z kołami czerpakowymi. Metody diagnostyki technicznej do oceny stanu technicznego układów napędowych okazały się nieodpowiednie. Próbowano bowiem prostej adaptacji metod diagnostyki stosowanych dla obiektów charakteryzujących się stałością obciążenia zewnętrznego. Metody te nie przyniosły zadowalających rezultatów. Rozwiązanie problemu diagnozowania stanu dla obiektów pracujących w zmiennych warunkach obciążenia (w zmiennych warunkach eksploatacyjnych) jest problemem należącym do zagadnień pierwszoplanowych.

Obiekty testowe obejmują turbiny wiatrowe i maszyny górnicze. Tego typu obiekty pracują w warunkach niestacjonarnych i stanowią szczególną trudność w diagnozowania ich stanu. Jako podstawę do rozwiązania problemu jest analiza czynników wpływających na sygnał wibroakustyczny. Czynniki te można podzielić na: konstrukcyjne, technologiczne, eksploatacyjne i zmianę stanu.

Zadaniem diagnostyki technicznej jest oczywiście określenie zmiany stanu obiektu. Jak wynika z doświadczeń diagnozowania stanu obiektów technicznych dla prawidłowego określenia stanu technicznego na podstawie sygnału wibroakustycznego obiektów konieczna jest znajomość innych czynników, które wynikają ze czynników konstrukcyjnych. Często jest konieczność bardzo szczegółowej znajomości konstrukcji obiektu diagnozowanego.

Drugim decydującym czynnikiem decydującym o prawidłowości wnioskowania diagnostycznego jest znajomość warunków eksploatacyjnych i w zależności od tych warunków prawidłowy dobór metod analizy sygnałów wibroakustycznych.

Z warunków eksploatacyjnych wynika, że obok śledzenia sygnału wibroakustycznego należy śledzić parametry pracy obiektu jak prędkość obrotową



lub przenoszoną moc. W przypadku turbin wiatrowych moc generowaną, w przypadku maszyn górniczych moc pobieraną.

Wychodząc z warunku konieczności znajomości cech konstrukcyjnych obiektów diagnozowanych opisano rodzaje turbin wiatrowych i ich konstrukcję. Dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych turbin wiatrowych z perspektywy europejskiej. Uwzględniając najczęściej występujący rodzaj obiektu jego dostępność do wykonania pomiarów dokonano wyboru obiektu. Z punktu widzenia diagnozowania obiektu jakim jest turbina wiatrowa koniecznym jest rejestracja sygnału wibroakustycznego z równoczesnym śledzeniem mocy generowanej przez turbinę wiatrową.

Po analizie popularności poszczególnych modeli maszyn oraz sprawdzeniu dostępności danych, szczegółowo przeanalizowano następujące typy turbin:

		Model	Drive train	Power rating [kW]	Rotor diameter [m]	Power conversion
1	Vestas	V90	Geared	3,000	90	Asynchronous
2	GE Energy	2.5XL	Geared	2,500	100	PMG converter
3	Gamesa	G90	Geared	2,000	90	DFIG
4	Enercon	E82	Direct	2,000	82	Synchronous
5	Suzlon	S88	Geared	2,100	88	Asynchronous
6	Siemens	3.6 SWT	Geared	3,600	107	Asynchronous
7	Acciona	AW-119/3000	Geared	3,000	116	DFIG
8	Goldwind	REpower750	Geared	750	48	Induction
9	Nordex	N100	Geared	2,500	99.8	DFIG
10	Sinovel	1500 (Windtec)	Geared	1,500	70	

W wyniku prowadzonych prac pozyskano i szczegółowo opisano zasadnicze cechy konstrukcyjne tej grupy maszyn.

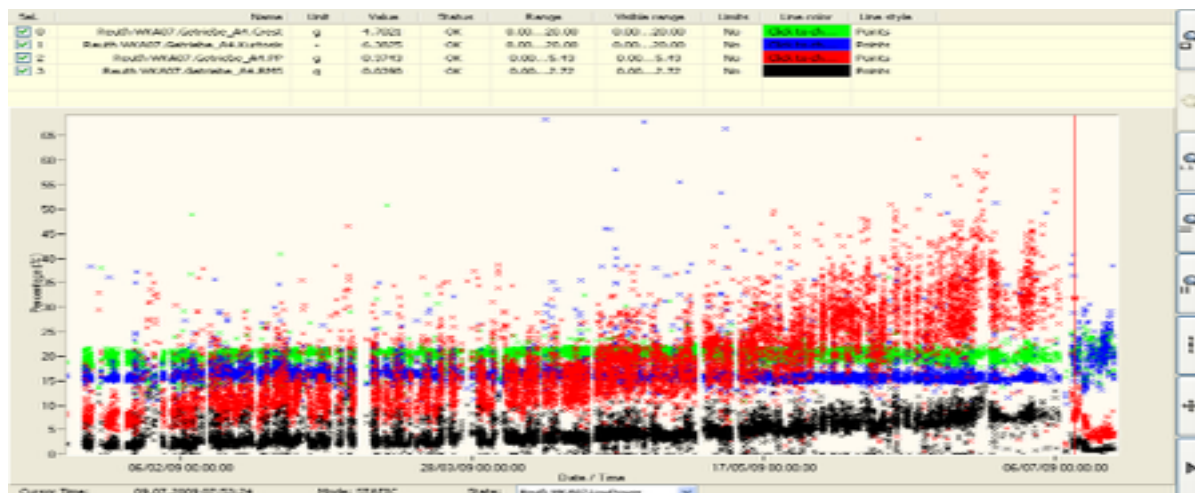
W wyniku kontaktów z partnerami przemysłowymi przeanalizowano duże ilości danych, w tym również obejmujące rzeczywiste przypadki uszkodzeń turbin. Uzyskane dane obejmowały następujące typy uszkodzeń:

- uszkodzenia łożyska głównego
- uszkodzenia łożysk przekładni
- uszkodzenia łożysk generatora
- uszkodzenia przekładni



- niewyważenie wału
- uszkodzenia generatora
- uszkodzenia łączone

Wykonano analizy dużej liczby uszkodzeń, pozyskując bardzo cenną bazę do dalszych prac. Poniższy rysunek przedstawia przykładowy trend obejmujący uszkodzenie łożyska przekładni planetarnej.



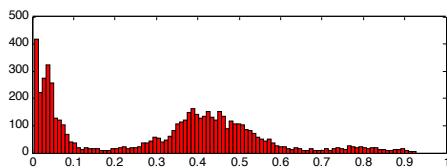
Obok obiektów jakimi są turbiny wiatrowe przedstawiono cechy konstrukcyjne maszyn górniczych i dla nich w szczególności analizowano:

- Układy napędowe przenośników taśmowych
- Układy napędowe koparek kołowych stosowanych w górnictwie odkrywkowym
- Układy napędowe kombajnów ścianowych: napęd głowicy urabiającej i napędu jazdy

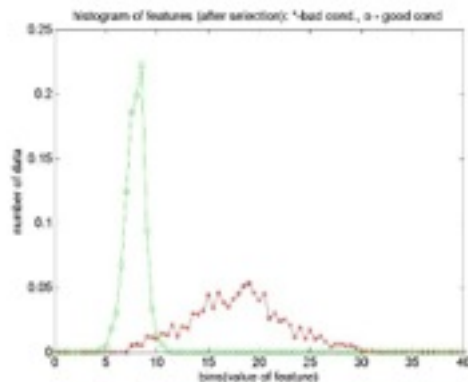
Podstawę układów napędowych w turbinach wiatrowych i maszynach górniczych stanowią przekładnie zębate. Główny nacisk technik oceny stanu obiektów

diagnozowanych jest opracowanie metod diagnostycznych przekładni zębatych pracujących przy zmiennych obciążeniach zewnętrznych. Przekładnie zębate składają się z różnych rodzajów kół zębatych jak koła walcowe o zębach prostych śrubowych, koła stożkowe o różnych liniach zębów, ślimaków, i ślimacznic. Koła te tworzą różne konfiguracje tworząc przekładnie wielostopniowe. Szczególny rodzaj przekładni stanowią przekładnie planetarne, które ze swej natury posiadają dwa stopnie swobody dla ruchu obrotowego. Jeden ze stopni swobody przekładni planetarnej jest często w praktyce odbierany. Tak więc przekładnia planetarna w układach napędowych elektrowni wiatrowych pracuje jako multiplikator (zwiększa prędkość obrotową) a jeden ze stopni swobody jest jej odebrany. Przekładnie planetarne można traktować jak przekładnie zespolone, które stanowią jeden ze stopni przekładni wielostopniowej. Szczególny rodzaj przekładni planetarnej stanowi przekładnia o dwóch stopniach swobody na którą w praktyce daje możliwość dwudroźnego przekazywania mocy co narzuca konieczność traktowania przekładni tego typu jako zespolone. Przekładnie planetarne są przekładniami z kołami pośrednimi, które nie wpływają na przełożenie tej przekładni a oś koła pośredniego jest ruchoma w przeciwieństwie do kół pośrednich stosowanych w układach napędowych ramion kombajnów węglowych gdzie osie kół pośrednich są nieruchome. Dalsze szczególne rozwiązanie stanowi układ napędowy koła czerpakowego koparki kołowej z mechanizmem przeciążeniowym. Taką przekładnię traktujemy jako przekładnię wielofunkcyjną. Jedną z funkcji jest jej praca w normalnych warunkach w ściśle określony maksymalnych przeciążeniach, moc transmitowana jest na koło czerpakowe. Drugą funkcję stanowi praca w warunkach przeciążenia moc transmitowana jest na hamulec przeciążeniowy.

Niezbędnym elementem stawiania diagnozy opisanych układów napędowych jest określenie: częstotliwości zazębienia, częstotliwości uszkodzeń lokalnych, określenie prędkości obrotowych wałów przekładni i określenie częstotliwości uszkodzeń łożysk tocznych. Dla znalezienia tych częstotliwości konieczna jest znajomość czynników konstrukcyjnych diagnozowanych przekładni. Wszystkie niezbędne zależności potrzebne do znalezienia wymienionych częstotliwości są przedmiotem etapu pracy dotyczącej identyfikacji charakterystyk diagnostycznych obiektów.



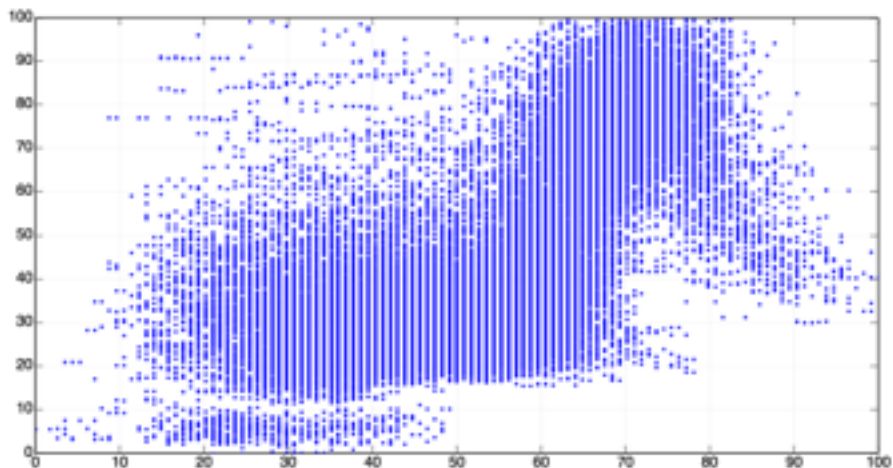
Rys.1



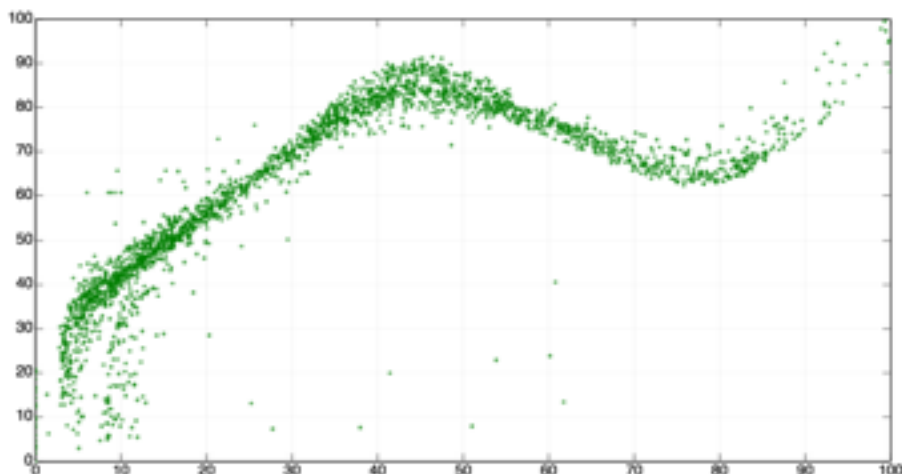
Rys.2

Przeprowadzono również pomiary wstępne parametrów diagnostycznych dla turbiny wiatrowej i napędu koła czerpakowego koparki kołowej - przedstawiają je powyższe rysunki. Dla turbiny wiatrowej przedstawiano wyniki rozkładów liczby pomiarów wartości parametru diagnostycznego w funkcji wartości parametru diagnostycznego, Rys.1. Dla koparki kołowej częstotliwość występowania danego pomiaru diagnostycznego w funkcji wartości pomiarowej Rys.2. Rys.1 dotyczy pomiaru stanu dla łożyska głównego rotora turbiny wiatrowej w stanie dobrym i awaryjnym. Rys.2 dotyczy pomiarów stanu przekładni planetarnej w odpowiednim i nieodpowiednim stanie technicznym przekładni. Rys.1 i 2 przedstawiają trudności w określenie stanu technicznego obiektów ponieważ jak pokazują histogram wartości pomiarowe dwu różnych stanów znacznie się pokrywają. W dalszych etapach pracy nastąpi szczegółowe opracowanie wyników pomiarów.

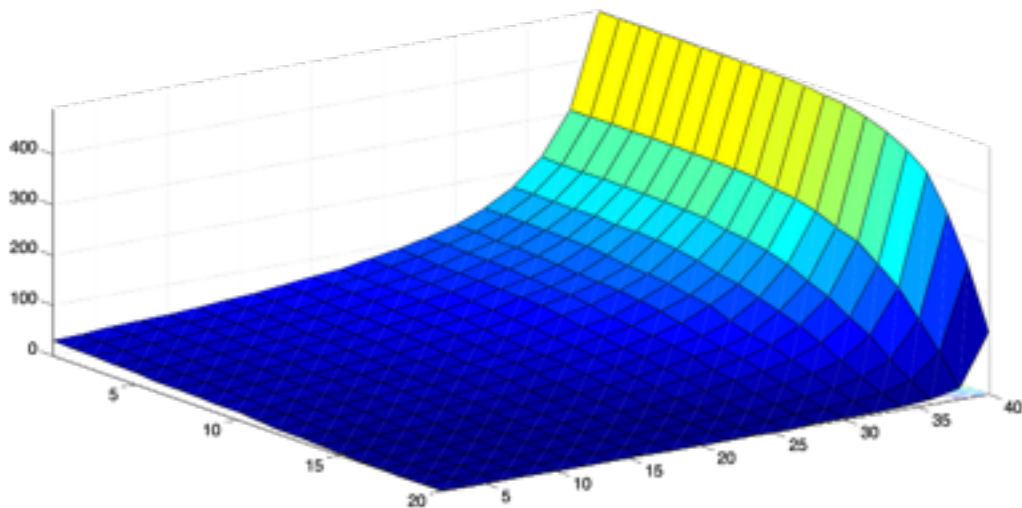
Badano modele zmienności warunków eksploatacyjnych oraz ich wpływ na parametry stanu dynamicznego. Poniższy rysunek przedstawia przykładową korelację bez uwzględnienia zmienności stanu pracy.



Po podniesieniu rozdzielczości danych oraz podniesieniu dokładności rozgraniczenia chwilowych stanów pracy, uzyskano dużo lepsze wyniki. Poniższy rysunek przedstawia zależność poziomu drgań od mocy z podniesioną dokładnością.



Wykonano również analizy możliwości określania quasi-stabilnych stanów pracy maszyny w zależności od przyjętych parametrów. Poniższy rysunek przedstawia przykładową zależność opracowaną na podstawie danych rzeczywistych. Jak widać, należy przyjmować warunki stabilności stanu pracy na poziomie do 2-5 minut długości pakietu danych drganiowych oraz do 10-15% fluktuacji mocy.



Opracowano model szybkości wiatru jako szeregu czasowego dla potrzeb zastosowania w cybernetycznym modelu turbiny wiatrowej jako modułu generującego zmienne obciążenia na przekładniach turbiny. Uwzględniono pewne charakterystyki szybkości wiatru jako funkcji czasu, które w dotychczasowych modelach wiatru znanych z literatury nie były brane pod uwagę, a które są kluczowe z punktu widzenia analizy obciążeń w przekładniach turbiny. Charakterystyki te są modelowane za pomocą fraktalnej komponenty modelu, która oddaje własność nieróżniczkowalności funkcji ciągłej.

Opracowano systemy sztucznej inteligencji do klasyfikacji stanów operacyjnych turbiny wiatrowej i przetestowano ich efektywność. Zaproponowano sieci neuronowe rezonansowe typu fuzzy-ART z rzutem stereograficznym jako elementem preprocessingu danych i eksperymentalnie wykazano ich efektywność używając danych z farmy wiatrowej.

Opracowano podstawy teoretyczne systemu diagnostycznego dla turbin wiatrowych. Zaproponowano hierarchiczny system ekspertowy oparty na dynamicznym drzewie wyvodu z modułami wnioskującymi w węzłach drzewa.

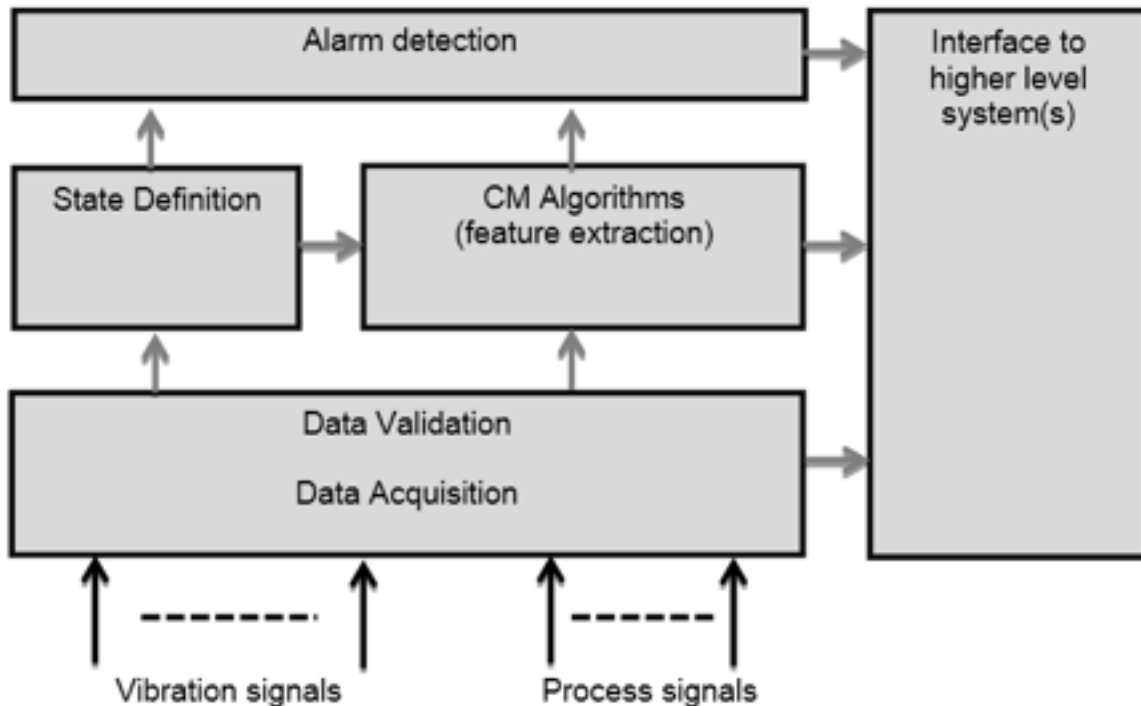
Wspomniane moduły wnioskujące mogą być oparte na wnioskowaniu probabilistycznym lub neuronalnym. Przetestowano wersję systemu z perceptronami jako modułami wnioskującymi. Istotną cechą zaproponowanej metodyki jest algorytm podziału zbioru danych w celu optymalizacji procesu wnioskowania.

Perceptrony użyte we wspomnianym systemie diagnostycznym będą przetwarzać m.in. sygnały o charakterze fraktalnym – pierwsze zadanie. W związku z tym kluczowe jest zbadanie problemu stabilności procesu nauki dla tego typu danych. Wyniki opisane w są częściowym rozwiązaniem tego problemu – na bazie znanego z literatury twierdzenia o topologicznym sprzężeniu gradientowych kaskad na różniczkach riemanowskich oraz korzystając z faktu istnienia własności shadowing dla gradientowych układów dynamicznych udowodniono numeryczną stabilność procesu nauki.

Zaproponowano układy neuronalne do wykrywania awarii i usterek mechanicznego systemu turbiny. Wykazano, że przy pomocy sieci typu komórkowego można wykrywać usterki analizując poszczególne kanały wibracyjne. Wykazano również, że przy pomocy sieci ART można skutecznie wykrywać usterki monitorując czterowymiarowe przestrzenie operacyjno-wibracyjne: trzy parametry operacyjne – prędkość wiatru, prędkość obrotowa rotora i moc generowanego prądu oraz jeden kanał wibracyjny.

Aby uzyskać pozytywne rezultaty zaproponowanych metod należy wprowadzać do systemu sztucznej inteligencji odpowiednie dane, które mogą być wyznaczone z obserwacji obiektów rzeczywistych. Obiekty rzeczywiste obserwowane przez odpowiednie pomiary przy zastosowaniu przy ich analizie nowych estymatorów oceny stanu całego obiektu i poszczególnych węzłów konstrukcyjnych.

Zaproponowano architekturę oraz zaimplementowano prototyp systemu monitorowania, który jest w stanie generować estymaty stanu technicznego monitorowanej maszyny. System wykonuje akwizycję danych z czujników, przetwarza dane drganiowe i procesowe zgodnie z opracowanymi algorytmami i przesyła wyniki do systemu nadrzędnego. Poniższy rysunek przedstawia ogólną architekturę zaproponowanego systemu.



Zaproponowana architektura systemu jest podsumowaniem badań prowadzonych w niniejszym projekcie i w latach poprzednich. Zaproponowano, jak można połączyć te metody. Obejmują one zasadnicze kroki pozyskiwania i przetwarzania danych, tj.:

- akwizycję danych,
- walidację danych,
- kompensację wpływu stanu pracy,
- separacja sygnału na komponent pochodzący od przekładni i łożysk

Opracowano i zaimplementowano prototypowy system inteligentnego monitoringu będący częścią zaprojektowanego systemu. Został on zaimplementowany na bazie sieci rezonansowej ART-2. Na wejście systemu podawane są dwie grupy parametrów. Pierwszą są wskaźniki operacyjne: prędkość wiatru, prędkość obrotowa wirnika turbiny wiatrowej oraz moc generowana przez generator turbiny.



Drugą są dane z czujników wibracyjnych umieszczonych w mechanicznym układzie turbiny. Zaznaczyć należy, że dane podawane na wejście systemu mogą być:

- rzeczywistymi danymi archiwalnymi z bazy danych, lub
- rzeczywistymi danymi podawanymi w czasie rzeczywistym, lub
- danymi symulacyjnymi, otrzymywanymi z symulatora zewnętrznych obciążeń turbiny, otrzymywanych na bazie modelu wiatru oraz z modeli mechanicznego systemu turbiny.