

**Recenzja rozprawy doktorskiej złożonej
w Politechnice Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich**

Tytuł: Monitorowanie stanu technicznego komponentów turbin wiatrowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego

Autor: Mgr inż. Jefferson da Silva Coelho

Dziedzina: Nauki inżynieryjno-techniczne

Dyscyplina w PBS: Inżynieria lądowa, geodezja i transport

Dyscyplina w UnB: Mechanika

Opiekunowie naukowci

Dr. hab. inż. Prof. Maciej Dutkiewicz, Politechnika Bydgoska

Dr. hab. inż. Prof. Marcela Rodrigues Machado, University of Brasília

Uwagi ogólne:

Rozprawa proponuje zautomatyzowaną metodę ekstrakcji atrybutów (cech) z sygnałów drgań mierzonych na turbinach wiatrowych oraz strukturach referencyjnych, a następnie analizę i korelację tych atrybutów z różnymi modelami uczenia maszynowego. Proces ten wykorzystuje informacje zarówno z dziedziny czasu, jak i częstotliwości, uwzględniając różnorodność formatów i jakości danych. Dodatkowo zastosowano techniki augmentacji danych w celu rozszerzenia bazy danych i poprawy skuteczności etapów klasyfikacji i regresji, których celem jest wykrywanie i ilościowa ocena uszkodzeń w analizowanych przypadkach.

Zastosowane algorytmy uczenia maszynowego to klasyczne metody, szeroko znane i uznane w środowisku naukowym, szczególnie w zastosowaniach związanych z monitorowaniem stanu technicznego (Structural Health Monitoring – SHM). Kody zostały opracowane w pakiecie propiety (oprogramowanie, którego kod źródłowy jest chroniony prawem autorskim) napisane w języku Python i udostępnione w repozytorium wraz z patentem i rejestracją. Autor, we współpracy z promotorami, zdecydował się wykorzystać dane pochodzące ze struktur referencyjnych, zamiast prowadzić eksperymenty w celu samodzielnego ich pozyskania. O ile wybór ten jest uzasadniony, częściowo ogranicza zakres możliwych sugestii i krytycznych uwag wobec pracy. Jednym z głównych wyzwań SHM jest obecnie określenie sposobu pozyskiwania danych, które umożliwią wczesne wykrywanie zmian stanu technicznego systemu inżynierskiego.

Próba wykorzystania wirtualnych czujników z fuzją danych, zaprezentowana w rozprawie, zasługuje na uznanie. Zauważono, że różnice w skuteczności testowanych algorytmów nie były istotne, a dokładność klasyfikacji utrzymywała się konsekwentnie powyżej 90%. Kluczowym zagadnieniem pozostaje koszt i wykonalność pozyskiwania sygnałów drgań oraz danych historycznych, niezbędnych do zasilania modeli.

Np., w przypadku wykorzystanej belki ORION (zespolona konstrukcja dwóch cienkościennych belek duraluminiowych, służąca jako platforma testowa do badań nad wykrywaniem i oceną uszkodzeń - przyp. tłum.) niezbędne jest przeprowadzenie pomiarów oraz analiza momentu dokręcania śrub w różnych warunkach, aby możliwe było wykonanie analiz regresyjnych. Konieczne jest również wykorzystanie szczegółowych, wstępnie przetworzonych danych w dziedzinie częstotliwości, opartych na charakterystykach transmitancji. Zastosowanie takiej procedury w rzeczywistym środowisku inżynierskim pociągałoby za sobą znaczne koszty implementacji w systemie SHM. Ponadto badana struktura ma charakter jednowymiarowy, jest małoskalowa i wyposażona w odpowiednio rozmieszczone czujniki. W przypadku wielkoskalowej, trójwymiarowej struktury, prawidłowe rozmieszczenie akcelerometrów oraz zapewnienie odpowiedniego poziomu obserwowalności w celu przeprowadzenia analogicznej procedury byłoby znacząco trudniejsze.

Uwagi i zastrzeżenia recenzenta

1. Różnice kontekstowe – Wyjaśnić, co odróżnia monitorowanie i eksploatację turbiny wiatrowej w Brazylii w porównaniu z Europą.
2. Czujnik wirtualny – Należy przedstawić bardziej precyzyjne wyjaśnienie, czym jest „zintegrowany czujnik wirtualny do augmentacji danych” oraz w jaki sposób został zaimplementowany.
3. Przegląd literatury – Przegląd koncentruje się głównie na pracach dotyczących metod monitorowania stanu technicznego (SHM), nie poświęcając wystarczającej uwagi zagadnieniom związanym z ekstrakcją i przetwarzaniem danych.
4. Tytuł pracy – Tytuł nie odzwierciedla w sposób adekwatny zakresu przeprowadzonych badań i zaprezentowanych wyników. Nawet w przeglądzie literatury główny nacisk położono na monitorowanie połączeń śrubowych, bez zaproponowania metod detekcji uszkodzeń w łopatach, gondolach ani wykorzystania danych pomiarowych pochodzących ze struktur z materiałów kompozytowych.
5. Formuła FRAC – Wydaje się, że zastosowano funkcje odpowiedzi częstotliwościowej (FRFs), które wymagają znajomości wzbudzenia. Jak zostanie to zrealizowane w praktyce, w sytuacjach, w których trudno jest zapewnić kontrolowane wzbudzenie lub dostęp do jego

pomiaru?

6. Podział danych – Czy zastosowano walidację krzyżową (cross-validation)? Aspekt ten nie został jasno przedstawiony w treści pracy.
7. Augmentacja danych – Czy wygenerowana zmienność była zgodna z rozkładami statystycznymi występującymi w danych oryginalnych, czy też ograniczała się jedynie do zakłóceń wprowadzonych do wyodrębnionych cech?
8. Rysunki bez odpowiednich legend – Niektóre rysunki nie zawierają odpowiednich legend, na przykład Rysunek 4.3. Nawet w podpisie brak informacji dotyczących warunków pomiarowych lub przedstawianych danych. Należy również załączyć tabelę z rozwinięciem skrótów symulowanych uszkodzeń (Aventa).
9. Przypadek belki Orion Beam – Wydaje się, że o skuteczności detekcji nie decydowały zastosowane algorytmy, lecz parametry spektralne oraz sposób wzbudzenia i opomiarowania układu. Potwierdza to fakt, że wszystkie algorytmy osiągnęły skuteczność klasyfikacji przekraczającą 90%.
10. Estymacja momentu na podstawie drgań – Aby uzyskać korelację pomiędzy sygnałami drganiowymi a momentem, konieczne jest dysponowanie danymi treningowymi pozyskanymi z miernika momentu (momentomierza). Rozwiązanie to wydaje się niepraktyczne, gdyż połączenia śrubowe w konstrukcjach często występują w dużej liczbie oraz w miejscach trudno dostępnych, co uniemożliwia zebranie reprezentatywnego zbioru danych do trenowania modeli predykcyjnych.
11. Wnioski – W pracy brakuje omówienia ograniczeń proponowanej metody oraz warunków eksperymentalnych, które w zaprezentowanej formie trudno uznać za możliwe do zastosowania lub uzasadnienia w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

Besançon, 7 września 2025.



Samuel da Silva
 Full Professor Departamento
 de Engenharia Mecânica UNESP
 Universidade Estadual Paulista
 Ilha Solteira, SP, Brazil

Documento assinado digitalmente
 **SAMUEL DA SILVA**
 Data: 07/09/2025 06:41:36-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>