

Wrocław, 14.09.2025 r.

prof. Andrzej Ubysz
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Konstrukcji Budowlanych



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Jeffersona da Silva Coelho

Structural health monitoring of wind turbines components using machine learning
Monitorowanie stanu technicznego turbin wiatrowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego

1. Informacje wstępne

Recenzję rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Jeffersona da Silva Coelho pt.: *Structural health monitoring of wind turbines components using machine learning* opracowano na podstawie Uchwały Senatu Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich nr 13/507 z dnia 25 czerwca 2025 roku oraz na podstawie art. 190 ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (tj. Dz. U. z 2024 roku poz. 1571, z późniejszymi zmianami) w zw. z § 7 ust.1 Uchwały nr 14/478 Senatu Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich z dnia 23.02.2023 roku *W sprawie sposobu postępowania o nadanie stopnia doktora i doktora habilitowanego*.

Promotorem pracy doktorskiej są Profesor Politechniki Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich, dr hab. inż. Maciej Dutkiewicz oraz dr hab. inż., Marcela Rodrigues Machado z University of Brasilia.

Badania te są częścią projektu nr 2022/45/P/ST8/02123 współfinansowanego przez Narodowe Centrum Nauki oraz Program Ramowy Unii Europejskiej w zakresie badań i innowacji Horyzont 2020 w ramach umowy o grant Marie Skłodowska-Curie nr. 945339, CNPq 444595/2024-4, FAPDF.00193-00002143/2023-02, FAPEAM – *Fundação de Amparo à pesquisa do estado do Amazonas (Fundacja Wsparcia Badań Stanu Amazonas)*.

Recenzja dotyczy merytorycznej oceny treści zawartej w wyżej wymienionej rozprawie doktorskiej.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Zadaniem postawionym przez Doktoranta w pracy jest dalszy rozwój metod opartych na analizie danych pomiarowych do monitorowania stanu technicznego turbin wiatrowych, zwiększając ich niezawodność i bezpieczeństwo użytkowania. Proponowane metody są szczególnie efektywne w ocenie stanu technicznego konstrukcji, w tym przypadku konstrukcji wieżowych obciążonych dynamicznie i cyklicznie. Autor skoncentrował się na złożonych systemach konstrukcyjno – budowlanych, jakim są turbiny wiatrowe. Wymagają one ciągłego monitorowania w celu zapewnienia efektywności użytkowej, minimalizacji kosztów oraz zapobiegania awariom. Są to konstrukcje wieżowe o znacznej wysokości i smukłości, znajdujące się pod działaniem złożonych obciążeń aerodynamicznych, wynikających z działania wiatru.

Inspiracją do tego tematu były między innymi wypadki o krótko- i długoterminowych skutkach wynikających z awarii lub katastrofy takich konstrukcji. Doktorant wyróżnił najczęstsze przyczyny tych awarii dzieląc je na 3 podstawowe kategorie.

- awarie spowodowane czynnikami mechanicznymi;
- awarie spowodowane czynnikami elektrycznymi ;
- awarie spowodowane czynnikami środowiskowymi.

Sformułowanym przez Doktoranta celem badawczym jest opracowanie metodologii monitorowania systemów i struktur na podstawie ich dynamicznej odpowiedzi z wykorzystaniem techniki SHM – ML (Structural Health Monitoring using Machine Learning – monitorowanie stanu technicznego z wykorzystaniem uczenia maszynowego). Przedstawiona w pracy metodologia pozwala na statystyczne rozpoznawanie wzorców i ilościowe określenie uszkodzeń, które oparte są na zdarzeniach losowych. Tak sformułowany ogólny cel badawczy zostały podzielony przez Autora na następujące szczegółowe zadania:

- implementacja architektury do wstępnego przetwarzania sygnału;
- opracowanie wirtualnego czujnika zintegrowanego z SHM-ML w celu zwiększenia ilości danych;
- zaprojektowanie ścieżki monitorowania z wykorzystaniem algorytmu uczenia maszynowego do rozpoznawania wzorców i wykrywania uszkodzeń oraz do ilościowego ujęcia uszkodzeń związanych z losowością zdarzeń;
- ocena wydajności metodologii SHM-ML z wykorzystaniem danych eksperymentalnych przetestowanych w systemach laboratoryjnych i na działającej turbinie wiatrowej in-situ.

Kolejnym etapem było udowodnienie skuteczności zaproponowanej metodologii, co wykazano na podstawie analizy przypadków dotyczących usterek mechanicznych w elementach turbin wiatrowych.

Pierwszy przypadek dotyczy wykrywania, klasyfikowania i rozpoznawania charakterystycznych wartości momentu obrotowego w konstrukcjach o połączeniach śrubowych. Mając na uwadze zmienność tych połączeń Doktorant zaproponował zarówno nadzorowane, jak i nienadzorowane algorytmy uczenia maszynowego. Metodologia opiera się na danych doświadczalnych zebranych w różnych warunkach testowych, wykorzystując surowe sygnały widma częstotliwości do oszacowania wskaźnika uszkodzeń, który służy do wyodrębnienia tych cech. Wskaźnik ten jest następnie przetwarzany przez algorytmy uczenia maszynowego, co umożliwia podejście uwzględniające zmienność i niepewność pomiarów bez konieczności przeprowadzania wcześniejszych analiz modalnych.

W drugim przypadku analiza opiera się na tym samym schemacie doświadczalnym, ale zwiększa efektywność wyznaczania zmian momentu obrotowego połączeń poprzez włączenie dodatkowych danych do prezentowanej w pracy metodologii nazywanej przez Doktoranta SHM-ML, co jest równocześnie literowym skrótem tytułu rozprawy. Również w tym przypadku wykorzystano widma częstotliwości. Wiele wyników badań opiera się na danych symulowanych, które często nie odzwierciedlają dokładnie warunków rzeczywistych, dlatego jednym ważniejszych celów tych badań było opracowanie ulepszonego modelu oceny stanu opartego na uczeniu maszynowym. Pozwolił on oszacować straty momentu obrotowego bezpośrednio na podstawie surowych widm sygnałów drgań. Takie podejście pozwoliło na poszerzenie bazy danych bez stosowania modeli numerycznych, a polegające wyłącznie na danych doświadczalnych.

Trzecie zastosowanie obejmuje monitorowanie rzeczywistej turbiny wiatrowej. W tym studium przypadku wykorzystano algorytm klastrowania bez nadzoru do klasyfikacji stanów operacyjnych i identyfikacji wzorców strukturalnych bez konieczności stosowania predefiniowanych etykiet.

Wprowadzono nową technikę wyróżniania cech w celu zwiększenia dokładności klasyfikacji, wykorzystującą metrykę zmienności względny wskaźnika uszkodzeń. Wykorzystywaną przez Doktoranta metodę monitorowania zarówno dla prostych jak i dla złożonych systemów można uznać jako realne rozwiązanie techniczne, które może zostać wykorzystane do kontroli turbin wiatrowych.

Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na rozwiązania do zdalnego monitorowania konstrukcji, w szczególności w celu wykrywania usterek w najbardziej wrażliwych elementach, przedstawiona metoda monitorowania wykorzystująca uczenie maszynowe jest niewątpliwym postępem technicznym w zastosowaniu do konserwacji turbin i będzie prowadzić do skrócenia czasu diagnozowania tych urządzeń.

3. Merytoryczna ocena osiągnięć pracy

Przegląd literatury

W rozdziałach prezentujących osiągnięcia innych autorów - na podstawie dyskusji przedstawionych w tym rozdziale – Doktorant pokazał, że obszar monitorowania stanu konstrukcji wciąż pozostawia wiele możliwości do dalszych badań w zakresie wykrywania usterek elementów turbin wiatrowych, w szczególności poluzowania śrub. Niniejsza praca wykorzystuje techniki monitorowania stanu technicznego turbin i uczenia maszynowego koncentrując się na analizie sygnału drgań, w celu identyfikacji poluzowania śrub oraz usterek w pracy turbiny wiatrowej w różnych scenariuszach uszkodzeń, takich jak niewyważenie aerodynamiczne łopat, oblodzenie wirnika i awaria sprzęgła elastycznego. Te zaawansowane techniki oferują szereg korzyści, w tym wczesne wykrywanie uszkodzeń i usterek eksploatacyjnych, precyzyjną identyfikację typów uszkodzeń, zwiększoną dokładność inspekcji, przewidywanie okresu eksploatacji i poprawę efektywności konserwacji. Te elementy łącznie mogą znacząco zwiększyć niezawodność i trwałość turbin wiatrowych.

Biorąc pod uwagę ograniczoną liczbę badań przeprowadzonych w tej dziedzinie w stosunku do jej znaczenia, istnieje pilna potrzeba opracowania i wykorzystania dokładnych i niezawodnych narzędzi do monitorowania konstrukcji.

Na podstawie analizy dotychczasowych badań Autor rozprawy ukierunkował badania własne na pogłębieniu zasobów wiedzy, stosując monitoring stanu technicznego turbin wiatrowych, co ostatecznie przyczyni się do stworzenia bezpieczniejszych i bardziej wydajnych systemów energetyki wiatrowej.

Monitorowanie stanu konstrukcji z wykorzystaniem uczenia maszynowego opartego na analizie zdarzeń losowych

W niniejszym rozdziale przedstawiono analizę przypadków zastosowania procesu monitorowania stanu technicznego turbin wiatrowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego zaproponowane w niniejszej pracy. Pierwsza z analiz ma na celu monitorowanie i klasyfikację uszkodzeń trzech przypadków podczas rzeczywistej pracy turbiny wiatrowej Aventa. Są tutaj wykorzystane surowe dane monitorujące widmo czasowe.

Druga analiza pozwoliła na wykrywanie zmian momentu dokręcenia połączenia śrubowego, głównie przy kołnierzach segmentów stalowej wieży turbiny. W celu określenia zmian momentu dokręcenia zastosowano sygnały spektralne w dziedzinie częstotliwości. Dane pochodziły z badań laboratoryjnych. W tym przypadku łączono techniki nadzorowane i nienadzorowane. Na podstawie odpowiedzi dynamicznej określono wskaźniki uszkodzenia.

Trzeci przypadek obejmuje ocenę zmiany momentu dokręcenia łączników. W tym przypadku zastosowano algorytm regresyjny w połączeniu z metodą rozszerzenia ilości danych w celu dokładniejszego oszacowania luzu momentu obrotowego na podstawie widma drgań. Uzyskane wyniki dowiodły wysokiej dokładności przy ocenie i klasyfikacji uszkodzeń, potwierdzając skuteczność opracowanej metody monitorowania konstrukcji z zastosowaniem uczenia maszynowego.

Uzyskane rezultaty przyczyniają się do rozwoju metod opartych na analizie danych pomiarowych przy monitorowaniu stanu technicznego konstrukcji turbin wiatrowych, zwiększając ich niezawodność i bezpieczeństwo użytkowania.

Uwagi końcowe

Badania zaproponowane w niniejszej rozprawie miały na celu opracowanie metodologii monitorowania systemów i konstrukcji turbin wiatrowych w oparciu o ich odpowiedź dynamiczną z wykorzystaniem uczenia maszynowego. W rozdziale piątym *Wnioski* Doktorant podsumował główne ustalenia przedstawione w trakcie badań oraz zebrał informacje i pośrednie wnioski zawarte w poszczególnych rozdziałach.

Aby poradzić sobie ze zmiennością surowych danych widmowych i szumem, Autor rozprawy zaprojektował klasyfikatory uczenia maszynowego, które zapewniają przedstawionej metodzie stabilność. Ponadto zaproponował podejście upraszczające analizę poprzez

wyeliminowanie konieczności oceny najbardziej wrażliwych cech i wprowadzając pojęcie wskaźnika uszkodzeń, który odgrywa kluczową rolę w metodologii niniejszego algorytmu. Pomimo ograniczeń zbioru danych, które mogą wpływać na wyniki, proponowana metodologia wykazała szerokie możliwości zastosowań przy monitorowaniu konstrukcji. Ograniczenie to zostało następnie uwzględnione w opracowanym algorytmie.

Zaproponowano dwa podejścia do ilościowego określania uszkodzeń konstrukcji. Pierwsze z nich polegało na opracowaniu wirtualnego czujnika przy monitorowaniu stanu technicznego turbin wiatrowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego w celu zwiększenia ilości danych poprzez połączenie danych fizycznych i syntetycznych, co z kolei pozwoliło na zwiększenie niezawodności i zakresu zastosowań proponowanej metodologii. Drugie podejście polegało na opracowaniu metodologii wykorzystującej algorytmy uczenia maszynowego do ilościowego określania uszkodzeń związanych z niepewnością procesu. Metodologia została zastosowana do oszacowania poluzowania momentu obrotowego śrub w połączeniach kołnierzych z wykorzystaniem surowych widm drgań i niepewności związanej z montażem w testach eksperymentalnych. Integracja wirtualnego czujnika do powiększenia ilości danych poprawiła niezawodność szacowania momentu obrotowego, równocześnie łagodząc problemy związane z ograniczonymi zbiorami danych w procesie monitorowania stanu technicznego turbin. Podejście to skutecznie wychwyciło zmiany momentu obrotowego, uwzględniając losową niepewność zmienności montażu, wykorzystując dziewięć nadzorowanych modeli regresji oraz wykorzystując wskaźniki uszkodzeń do wyodrębnienia cech w wybranych pasmach częstotliwości. Wyniki podkreślają skuteczność połączenia zwiększenia ilości danych z technikami regresji maszynowego uczenia.

W rozprawie zaproponowano ocenę wydajności metodologii procesu monitorowania stanu technicznego turbin wiatrowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego opartej na danych, wykorzystując dane eksperymentalne przetestowane na działającej turbinie wiatrowej. Metodologia wykorzystwała technikę klasteryzacji k-średnich bez nadzoru do klasyfikacji i grupowania danych w jednorodne klastry, umożliwiając identyfikację wzorców bez predefiniowanych etykiet. Do wykrywania usterek zastosowano dwa rodzaje klasyfikacji: binarną i wieloklasową. Wyniki klasyfikacji binarnej osiągnęły rezultaty, odzwierciedlające zdolność do odróżniania warunków normalnych od usterek w różnych orientacjach danych. W klasyfikacji wieloklasowej podejście to umożliwiło identyfikację wielu stanów pracy i różnych poziomów uszkodzeń z dużą precyzją, wyróżniając się w rozróżnianiu klas.

W dysertacji przedstawiono ponadto możliwe kierunki przyszłych badań.

4. Końcowe wnioski

Niniejsza monografia stanowi nowe, oryginalne podejście do monitorowania konstrukcji podatnych dynamicznie. Doktorant oparł swoją rozprawę na światowych badaniach naukowych, głównie ostatniego dziesięciolecia (blisko 300 pozycji literaturowych). Podstawowym osiągnięciem niniejszej rozprawy jest opracowanie oryginalnej metody monitorowania stanu technicznego turbin wiatrowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

Dysertacja ma charakter teoretyczny, jednak przedstawiona metoda może mieć bezpośrednie zastosowanie do obiektów inżynierskich i powinna zainteresować rzeczoznawców budowlanych.

Podsumowując, rozprawa doktorska Pana mgr inż. Jeffersona da Silva Coelho stanowi wartościowy wkład w rozwój dyscypliny w zakresie badań podatnych dynamicznie konstrukcji budowlanych. Prace uważam za oryginalną i wartościową oraz zasługującą na wyróżnienie. Biorąc pod uwagę wymogi art. 190 ust. 2 i art. 183 Ustawy z dnia 20 lica 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tj. Dz. U. z 2024 roku poz. 1571, z późniejszymi zmianami) stwierdzam za treścią Ustawy, że:

1. Rozprawa doktorska przedstawia ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata w zakresie dyscypliny lub dyscyplin oraz zdolność do samodzielnego prowadzenia działalności naukowej lub artystycznej,

2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne osiągnięcie artystyczne.

i wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Jeffersona da Silva Coelho do publicznej obrony niniejszej rozprawy doktorskiej.

