



Dr hab. inż. Roman Starosta  
Zakład Mechaniki Technicznej  
email: roman.starosta@put.poznan.pl

Poznań, 7.07.2024r.

### **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja Badory**

**pt. „A method for predicting the size of damage to gas turbine components based on machine learning algorithms, applicable at the early stages of parts' lifetime”**

**Promotor rozprawy doktorskiej:** prof. dr hab. inż. Tomasz Szolc

**Podstawa opracowania recenzji:** Uchwała Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN z dnia 25 kwietnia 2024 roku oraz ustawa z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.)

#### **1. Przedmiot recenzji**

Praca doktorska Pana mgr. inż. Macieja Badory jest napisana w języku angielskim, ma 165 stron, składa się z 7 rozdziałów, Streszczenia, Wykazu oznaczeń i symboli oraz *Bibliografii* zawierającej 215 pozycji. Cytowana literatura obejmuje podręczniki, prace przeglądowe, artykuły opublikowane w ostatnich latach oraz dotyczące przełomowych badań. Dobór cytowanej literatury pokazuje, że dysertacja opiera się na najnowszych osiągnięciach i aktualnych trendach. W pracy zamieszczone są łącznie 64 rysunki przedstawiające w formie wykresów wyniki obliczeń a także zawierające zdjęcia badanych układów i schematy strategii obliczeniowych.

#### **2. Tematyka rozprawy i jej znaczenie**

Problemy badawcze podjęte w pracy doktorskiej dotyczą opracowania metod przewidywania wielkości uszkodzeń części turbin gazowych przy użyciu algorytmów uczenia maszynowego. Badania skupiają się na tworzeniu modeli które z dużą precyzją przewidzą wzrost pęknięć zmęczeniowych łopatek sprężarki turbin gazowych przy ograniczonym dostępie do danych empirycznych. Z uwagi na trudność w uzyskiwaniu danych pomiarowych autor zaproponował połączenie metod uczenia maszynowego z wiedzą teoretyczną dotyczącą mechanizmu wzrostu pęknięć zmęczeniowych. W dysertacji przebadano różne algorytmy uczenia maszynowego, rozwinięto modele hybrydowe. Ponadto opracowano nową metodę pozwalającą na uogólnienie wyników uzyskanych w danym obszarze na pozostałą część segmentu sprężarki. Opracowane podejście umożliwia uzyskanie wiarygodnych wyników analizy uszkodzeń w obszarze dla którego nie są dostępne dane pomiarowe.

Oprócz badań uszkodzeń zmęczeniowych analizowany jest ubytek materiału w ścianach kanałów dolotowych i wylotowych wysokowydajnej turbiny gazowej będący wynikiem utleniania.

### **3. Omówienie zawartości rozprawy**

Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie, w którym przedstawiono cywilizacyjne wyzwanie dotyczące wzrostu zapotrzebowania na energię oraz znaczenie turbin gazowych w tym aspekcie. Podkreślono znaczenie skutecznych narzędzi kontroli pracy turbin gazowych oraz potencjał uczenia maszynowego w zakresie usprawnienia metod diagnostycznych.

W drugim rozdziale Autor zamieścił ogólne omówienie podjętej tematyki. W tej części jasno przedstawiono co jest przedmiotem rozprawy i jaki jest cel przeprowadzonych badań. Głównym celem badawczym jest opracowanie metod bazujących na uczeniu maszynowym pozwalających na przewidywanie wzrostu uszkodzeń części turbin gazowych. Autor zaznacza, że metoda ma być skuteczna przy niewielkiej liczbie dostępnych danych pomiarowych potrzebnych do wytrenowania sieci neuronowej. W celu zapewnienia wiarygodności wyników wymaga się aby badany proces wzrostu pęknięć zmęczeniowych był zgodny z wiedzą teoretyczną dotyczącą tego zagadnienia.

W tej części pracy zostały postawione tezy w których zakłada się możliwość opracowania skutecznych narzędzi informatycznych pozwalających na efektywne wykrywanie i przewidywanie uszkodzeń zmęczeniowych przy małej liczbie dostępnych danych pomiarowych. Opracowany algorytm powinien mieć charakter hybrydowy tzn. łączyć metody uczenia maszynowego z wiedzą teoretyczną o badanych zjawiskach. W dalszej części Autor przedstawia zakres i strukturę pracy.

Z uwagi na poufny charakter przedstawionych badań, dane pomiarowe nie są udostępnione w pracy i zostały zanonimizowane.

W rozdziale 3 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące konserwacji i utrzymania pracy turbin gazowych mające na celu zapewnienia ich niezawodności. Autor zaznacza, że turbiny gazowe odgrywają kluczową rolę m.in w wytwarzaniu energii i procesach petrochemicznych. Wymienione są podstawowe strategie nadzoru i utrzymania ruchu turbin, a także warunki pracy które należy uwzględniać w przeglądach. Wymienione są takie czynniki jak: typ paliwa, czas pracy z prędkościami przekraczającymi prędkość nominalną, liczba uruchomień i awaryjnych zatrzymań, obciążenie i in.

Przewidywanie zużycia technicznego części turbiny gazowej jest zagadnieniem interdyscyplinarnym gdyż obejmuje szereg zagadnień takich jak określenie charakterystyki operacyjnej, analizę termiczną i strukturalną, dobór materiałów i oszacowanie kosztów. Do analizy naprężeń i przewidywania trwałości elementów turbin gazowych szeroko jest stosowana Metoda Elementów Skończonych, która pozwala oszacować wielkość uszkodzeń spowodowanych zmęczeniem termomechanicznym, utlenianiem i pełzaniem. Stosuje się też inne strategie np. podejścia statystyczne do detekcji pęknięć na podstawie danych pomiarowych lub analizę przepływu gazu opisywanego równaniami termodynamiki. Omówiono także tzw. analizę Weibull'a. W dalszej części Autor przedstawia podstawowe strategie uczenia maszynowego: uczenie nadzorowane, uczenie nienadzorowane, uczenie przez wzmacnianie oraz podejście hybrydowe łączące wiedzę teoretyczną z algorytmem uczenia maszynowego w celu zwiększenia poprawności wyników. Autor



podkreśla znaczenie integracji tradycyjnych podejść inżynierskich z nowoczesnymi technikami uczenia maszynowego w celu poprawy niezawodności i ogólnej wydajności turbin gazowych.

Czwarty rozdział jest poświęcony zastosowaniom różnych metod uczenia maszynowego w zastosowaniu do przewidywania rozwoju pęknięć zmęczeniowych. Przedmiotem szczegółowych analiz są dysze wysokiego ciśnienia wysokowydajnej turbiny gazowej. W tej części pracy Autor opisuje zasadę działania turbiny gazowej oraz omawia przyczyny występowania uszkodzeń. Omówiono kwestie pozyskiwania danych do systemu uczącego, w tym pomiarów długości szczelin oraz danych eksploatacyjnych. Dyskutowana jest dostępność danych, ich ilość i jakość oraz potrzeba ich odpowiedniego opracowania. Pozyskane dane dzielone są na zbiory uczące, walidacyjne i testowe. Przedstawiono kryteria wyboru danych pomiarowych pozwalających na opracowanie dokładnych i wiarygodnych modeli predykcyjnych i zaprezentowano osiem modeli regresji. Szczegółowo omówiono wyniki obliczeń, podając dokładność i wiarygodność predykcji różnych modeli. Przewidywane długości pęknięć zmęczeniowych uzyskane różnymi metodami porównano do wartości zmierzonych a wyniki tej analizy przedstawiono na wykresach.

Kolejny 5 rozdział poświęcono metodom przewidywania pęknięć zmęczeniowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego i wiedzy o fizyce tego zjawiska. Model był trenowany przy użyciu rzeczywistych danych operacyjnych oraz wyników symulacji numerycznej. Do estymacji współczynnika intensywności naprężeń użyto rekurencyjnej sieci neuronowej RNN. W algorytmie obliczeniowym zastosowano funkcję kosztu, która dynamicznie zmienia się podczas procesu treningowego aby zbalansować udział danych empirycznych i prawa fizycznego. Modele hybrydowe oparte na PINN (ang. physics-informed neural network) wykazały satysfakcjonującą dokładność, nawet poza oryginalnym obszarem treningowym. Porównanie wyników uzyskanych różnymi metodami pokazało, że PINNs osiągnęły najwyższą dokładność przewidywania uszkodzeń. Ponadto Autor zaproponował metodę uogólniania wyników regresji w taki sposób aby model wytrenowany na danych w obszarze źródłowym mógł posłużyć do predykcji uszkodzeń w innym, docelowym obszarze dla którego trudno jest uzyskać dane pomiarowe. W efekcie badań modele oparte na PINN wykazały zdolność do przewidywania wielkości uszkodzeń z ograniczonymi danymi treningowymi, zachowując zgodność z prawami fizyki opisującymi analizowane zjawisko.

W rozdziale 6 zastosowano metody opracowane we wcześniejszych etapach pracy do zbadania innego zagadnienia jakim jest ocena ubytku materiału w elementach turbin gazowych na skutek korozji. Celem jest, podobnie jak w rozdziale 5, włączenie praw fizycznych do uczenia sieci neuronowych, aby zwiększyć dokładność przewidywań, szczególnie w przypadku ograniczonej liczby danych pomiarowych w obszarze docelowym. Uwzględnienie w procesie uczenia sieci neuronowej równań różniczkowych opisujących proces utleniania zapewnia zgodność wyników z prawem fizycznym. W rozdziale porównano wydajność PINN z tradycyjnymi modelami uczenia maszynowego, które nie uwzględniają praw fizycznych. Wykazano, że PINN przewyższa te modele zarówno pod względem dokładności, jak i niezawodności. Włączenie praw fizycznych do uczenia sieci neuronowych znacząco poprawia dokładność przewidywań utraty metalu w wyniku utleniania.

Ostatni, 7 rozdział stanowi podsumowanie i zawiera konkluzje. Na podstawie przeprowadzonych badań Autor stwierdza, że hybrydowe modele oparte na PINN są w stanie przewidywać wielkość uszkodzeń z wysoką dokładnością nawet przy ograniczonych danych empirycznych. Metody te okazały się skuteczne zarówno w przypadku pęknięć zmęczeniowych, jak i redukcji



grubości ścianek spowodowanej utlenianiem. Opracowane modele mogą być stosowane w różnych fazach cyklu życia części turbin gazowych, od etapu projektowania, przez pierwsze testy, aż po eksploatację rynkową. Dalsze badania mogą skupić się na rozszerzeniu opracowanych modeli o dodatkowe typy uszkodzeń i komponentów turbin gazowych, co pozwoli na jeszcze szersze zastosowanie praktyczne.

Rozprawę kończy Bibliografia zawierająca aktualne i właściwie dobrane źródła w postaci monografii, podręczników, źródeł internetowych i artykułów naukowych.

Wymiernym rezultatem pracy doktorskiej jest opracowana metoda oparta na algorytmach uczenia maszynowego i uwzględniająca prawa fizyczne pozwalająca przewidywać wielkość uszkodzeń w częściach turbin gazowych. Tym samym osiągnięto założony cel i potwierdzono tezę postawioną we Wstępie.

#### **4. Uwagi do pracy**

Tematyka pracy jest bardzo wąska, dotyczy badania uszkodzeń konkretnego elementu urządzenia produkowanego przez jedną firmę. Zwykle prace doktorskie mają charakter bardziej ogólny, dotyczący szerszego spektrum zastosowań lub badanych zjawisk. Tak zawężona tematyka jest związana zapewne ze specyfiką doktoratu wdrożeniowego.

Zamieszczenie większej liczby schematów i zdjęć badanych układów zwiększyłoby czytelność pracy. Czytelnik nie zajmujący się turbinami gazowymi może nie wiedzieć dokładnie jaki jest kształt badanych części i w którym dokładnie miejscu się znajdują. Autor pisze np. o „can-type combustors”, „transition pieces”, itp. nie podając szczegółów ich budowy. Przedstawiony na rysunku 46 element również wydaje się mało czytelny.

Nie jest doprecyzowane pojęcie „domain”. Nie podano jakie są rozmiary takiej domeny i jej położenie.

Nie jest jasne do czego odnosi się pojęcie „Position 1”, „Position 2”, etc. Na rysunku 47

#### **5. Najważniejsze oryginalne osiągnięcia pracy**

Przeprowadzone badania mają bardzo utylitarny charakter. Koncentrują się na wąskim zakresie tematycznym dotyczącym przewidywania wzrostu pęknięć zmęczeniowych w dyszach, oraz ubytku materiału ścian kanałów turbin gazowych wytwarzanych przez firmę Baker Hughes Company.

Największym osiągnięciem mgr. inż. Macieja Badory, opisanym w jego rozprawie doktorskiej, jest opracowanie nowatorskiej metody przewidywania wielkości uszkodzeń elementów turbin gazowych z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego, w szczególności sieci neuronowych opartych na prawach fizycznych (PINN).

Szczególnie warto podkreślić:

- opracowanie hybrydowych modeli uczenia maszynowego które uwzględniają prawa fizyczne, co zapewnia wiarygodne przewidywanie wzrostu uszkodzeń, nawet przy ograniczonym dostępie danych pomiarowych,

- zaproponowanie metody uogólniania wyników tak aby możliwe było zastosowanie modelu predykcyjnego w innych obszarach niż te dla których sieć neuronowa była wytrenowana,
- zastosowanie opracowanej metody do przewidywania wzrostu pęknięć zmęczeniowych i zmniejszenia grubości ścianek turbin gazowych na skutek utleniania.

Wykazano przy tym wszechstronność metody i możliwość jej zastosowania do różnych typów uszkodzeń i elementów turbiny gazowej.

W opiniowanej rozprawie Doktorant wykazał się dobrą znajomością zaawansowanych teoretycznych i praktycznych zagadnień uczenia maszynowego. Posiada dużą biegłość w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami w zakresie analizy statystycznej, sieci neuronowych i uczenia maszynowego.

Pozytywnie oceniam oryginalność, innowacyjność i poziom naukowy opiniowanej rozprawy.

Język pracy jest czytelny. Autor w sposób jasny i zrozumiały przedstawia swoje badania. Tekst został napisany starannie, strona edytorska jest na bardzo dobrym poziomie.

## **6. Podsumowanie**

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę treści rozprawy stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” z późn. zm. oraz w Rozporządzeniu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 11 października 2022r. Zrealizowana przez mgr. inż. Macieja Badorę rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej „Inżynieria mechaniczna”. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego oraz wskazuje na wysoki poziom wiedzy jej Autora.

Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.



