

Gdańsk, dnia 6 sierpnia 2024

Prof. Wiesław Ostachowicz
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
w Gdańsku

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana 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

Uwagi ogólne

Podstawę prawną do napisania niniejszej recenzji stanowi pismo Pana Profesora Zbigniewa Ranachowskiego, Sekretarza Rady Naukowej, Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie. Pismo o sygnaturze RN-D.0002.1.2024 z dnia 29 kwietnia 2024 wraz z jednym egzemplarzem rozprawy doktorskiej otrzymałem w pierwszych dniach maja 2024.

Cele i tezy rozprawy

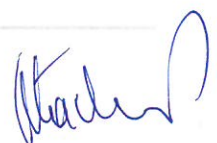
Mgr inż. Maciej Badora w sposób jednoznaczny sformułował **cele rozprawy**. Autor rozprawy przyjął jako główny cel badań opracowanie metody opartej na algorytmach uczenia maszynowego, która umożliwi przewidywanie wielkości uszkodzeń elementów turbin gazowych. Określił także cztery cele szczegółowe, a więc:

- opracowanie modeli, które powinny uwzględniać wiedzę i prawa fizyczne opisujące badane zjawiska;
- opracowanie uniwersalnej metody, która znajdzie zastosowanie przy modelowaniu uszkodzeń powstałych na skutek różnych typów awarii występujących w elementach turbin gazowych;
- przyjęto ustalenie, że metodę można stosować na wczesnych etapach tworzenia komponentów (np. na etapie projektowania, pierwszych testów części lub pierwszych zastosowań w praktyce);
- przyjęto także założenie, że opracowana metoda umożliwi i zapewni wartościowe spostrzeżenia nawet przy ograniczonej dostępności pomiarów uszkodzeń i niewielkiej liczbie obserwacji (np. poniżej 30 punktów danych do wytrenowania i przetestowania modelu).

Stwierdzam, że założone przez Autora cele osiągnięto poprzez opracowanie modeli hybrydowych, które oparto na sieciach neuronowych wykorzystujących zjawiska fizyczne w połączeniu z nowatorską metodą uogólnienia dziedzin.

Warto w tym miejscu podkreślić, że zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego w optymalizacji utrzymania maszyn i urządzeń w ruchu wpisuje się w strategię najnowocześniejszych rozwiązań wielu innowacyjnych jednostek przemysłowych.

Mgr inż. Maciej Badora sformułował trzy **tezy rozprawy**, które stanowiły podstawę jego inspiracji i działań badawczych.



W pierwszej tezie Autor zawarł stwierdzenie, że modele oparte na algorytmach uczenia maszynowego pozwalają z dużą dokładnością przewidywać wielkość uszkodzeń części turbin gazowych w obszarach, w których jest ograniczona dostępność pomiarów uszkodzeń (albo ich brak).

W drugiej tezie Autor zamierzał wykazać, że modele akumulacji uszkodzeń oparte na algorytmach uczenia maszynowego można skutecznie trenować, dobrze uogólniać ich cechy oraz przedstawiać dokładne oszacowania, nawet w przypadkach, gdy w próbie zarejestrowano tylko kilka wyników (np. mniej niż 10 punktów danych).

W trzeciej tezie Autor postanowił wykazać, że rozmiar uszkodzeń części turbin gazowych można dokładnie przewidzieć za pomocą modeli hybrydowych łączących algorytmy uczenia maszynowego z wiedzą teoretyczną o typie analizowanej awarii (nawet w przypadkach, gdy szeregi czasowe parametrów pracy turbiny są niekompletne).

Przyjęcie takich celów rozprawy doktorskiej a także sformułowanie ciekawych tez oceniam bardzo wysoko. Tym bardziej, że osiągnięcie założonych celów pracy i udowodnienie tez rozprawy, wymagało podjęcia przez Doktoranta bardzo dużego wysiłku i wiedzy.

Opis rozprawy

Rozprawa doktorska stanowi zwarty dokument liczący **165** stron. Praca zawiera wstęp napisany w języku angielskim oraz polskim. Rozprawa jest napisana w języku angielskim (z wyjątkiem streszczenia). Praca składa się z **7** rozdziałów, spisu skrótów a także bibliografii liczącej **215** pozycji.

Przed wszystkim na uznanie zasługuje staranne przygotowanie przeglądu dotychczasowego stanu wiedzy z zakresu metody opartej na algorytmach uczenia maszynowego umożliwiającej przewidywanie wielkości uszkodzeń elementów turbiny gazowej. Przeprowadzony przegląd literatury i jego analiza ułatwiła Doktorantowi prawidłowe sformułowanie programu badań własnych. Metoda zaproponowana przez Autora znajduje zastosowanie na wczesnych etapach tworzenia narzędzi wykorzystywanych do modelowania uszkodzeń spowodowanych różnymi rodzajami awarii, które występują w głównych elementach turbin. Połączenie algorytmów uczenia maszynowego z wiedzą teoretyczną w model hybrydowy może stanowić skuteczne narzędzie badawcze nawet wówczas, gdy dostępność danych empirycznych jest znacznie ograniczona. Model badawczy zawiera liczby, struktury, operacje matematyczne, reguły i inne parametry specyficzne dla algorytmu, które są niezbędne do przygotowania danych wejściowych. Parametry te są ustalane podczas uczenia poprzez zastosowanie wybranego algorytmu uczenia maszynowego. Doktorant w swoich badaniach zastosował modele hybrydowe, które opracowano dla sieci neuronowych wspomaganych prawami fizyki. Wspomniane sieci neuronowe zawierają równaniami opisujące analizowany problem. Co więcej, opracowana metoda powinna być skuteczna nawet przy ograniczonej dostępności pomiarów wielkości uszkodzeń. Ponadto modele utworzone tą metodą będą uwzględniały wcześniejszą wiedzę i prawa fizyczne rządzące analizowanym zjawiskiem.

Podsumowując ten fragment opisu aktywności i dokonań Doktoranta stwierdzam, że przedstawione osiągnięcia zawierają szereg elementów innowacyjnych i tym samym przekraczają ramy wymagań rozpraw doktorskich. Moim zdaniem recenzowana rozprawa



wnosi wiele wartości naukowych do dyscypliny inżynieria mechaniczna. W części końcowej rozprawy sformułowano wnioski i uwagi oraz wskazano kierunki dalszych badań.

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska, w której Autor przedstawia metody badań nad przewidywaniem rozmiaru uszkodzeń części turbin gazowych za pomocą algorytmów uczenia maszynowego. Przyjęto założenie, że liczba pomiarów uszkodzeń jest ograniczona a także istnieje możliwość braku dostępu do niektórych danych. Autor przedstawia w rozprawie prace badawcze, które dotyczą oceny maksymalnej długości pęknięć zmęczeniowych występujących na łopatkach kierowniczych oraz przewidywania redukcji (na skutek utleniania) grubości ścianki elementu łączącego komorę spalania z sekcją turbiny. A zatem głównym celem badań jest opracowanie metody prognozowania rozmiaru uszkodzeń przy wykorzystaniu algorytmów uczenia maszynowego. Autor przyjął założenie, że zaproponowane przez niego metody będzie można stosować do różnego rodzaju defektów, niezależnie od liczby dostępnych pomiarów uszkodzeń.

W pierwszym etapie badań Autor przedstawił metody szacowania długości pęknięć zmęczeniowych. Do tego celu wykorzystał znane algorytmy uczenia maszynowego. Badania przeprowadzono na próbce zawierającej 25 pomiarów uszkodzeń. Doktorant wykorzystał do badań niestandardową funkcję kosztu natomiast elementy zbioru uczącego, testowego oraz walidacyjnego dobrał w sposób nadzorowany. Do przeprowadzenia obliczeń Autor wykorzystał rzeczywiste dane z badanego/badanych obiektów. W końcowej części dysertacji wykazał, że końcowe wyniki obliczeń mogą być wystarczająco dokładne pomimo nielicznych danych zarejestrowanych na próbkach. W drugim etapie badań Autor dysertacji postanowił zastosować sztuczną sieć neuronową opracowaną na podstawach praw fizyki (ang. *physics-informed neural network*).

Analizowane typy uszkodzeń, a więc pęknięcia powstałe na skutek zmęczenia niskocyklowego oraz ubytek materiału na krawędziach tylnych dysz wysokociśnieniowych turbiny gazowej na skutek utleniania, podlegają różnym prawom fizycznym. Takie obiekty i typy uszkodzeń zostały wybrane celowo, aby wykazać, że proponowana metoda predykcyjna daje zadowalające wyniki dla różnych problemów fizycznych i konfiguracji układów. Niemniej jednak obowiązkowym warunkiem stosowania tej metody jest dostępność pomiarów uszkodzeń i odpowiednich danych eksploatacyjnych turbiny gazowej zarejestrowanych przez system gromadzenia danych.

Aby rozwiązać wybrane problemy techniczne Doktorant zaprojektował i zastosował dwie różne sieci neuronowe oparte na prawach fizyki. W pierwszym modelu przedstawił sieć neuronową, do przewidywania wzrostu pęknięć zmęczeniowych. W drugim przypadku zaproponował sieć przeznaczoną do szacowania redukcji grubości ścianki wylotowej w wyniku utleniania materiału. W obydwu przypadkach wykorzystał rekurencyjne sieci neuronowe, co zdaniem recenzenta stanowi racjonalny w tym przypadku wybór do opisu postępującej, nieodwracalnej kumulacji uszkodzeń. Przyrost uszkodzeń jest obliczany na podstawie praw fizyki. Obliczenia przyrostu uszkodzeń dokonuje się w każdym kroku czasowym na podstawie obliczeń teoretycznych lub ustala się eksperymentalnie. Do wzrostu pęknięć zmęczeniowych zastosowano prawo Parisa, natomiast szybkość tworzenia się kamienia tlenkowego opisano funkcją potęgową. Wyniki uzyskane zaproponowaną przez Doktoranta metodą można uznać za

dobrze. Ukryte informacje i wiedza wydobyte z danych empirycznych dostępnych w domenie źródłowej zostały wykorzystane i skutecznie wykorzystane w domenie docelowej.

Przyjęta przez Autora koncepcja prowadzi do uzyskania lepszego uogólnienia i stworzenia możliwości ekstrapolacji a także otrzymania wyników zgodnych z równaniami opisującymi wzrost długości pęknięć zmęczeniowych.

Uwagi końcowe:

Układ pracy doktorskiej jest prawidłowy. Dysertacja jest dobrze przedstawiona, a wszystkie rozdziały są logicznie ułożone. Należy zaznaczyć, że proporcja części eksperymentalnej i obliczeniowej rozprawy jest dobrze wyważona. Wnioski Doktoranta są trafne, a przedstawiony w rozprawie perspektywiczny plan badań wskazuje na możliwość uwzględnienia bardziej szczegółowych metod monitorowania stanu strukturalnego tej techniki. Metodologie testuje się na próbkach, zwiększając złożoność badania.

Spis literatury obejmuje 215 pozycji, które wykorzystano w całej rozprawie. Oceniający uważa, że wybór literatury jest w pełni uzasadniony i mieści się w zakresie tematyki rozprawy. Jestem zatem przekonany, że Doktorant doskonale orientuje się w temacie swoich badań.

Cel merytoryczny rozprawy jest jasno określony, a potencjalny czytelnik z łatwością może przyswajać przekazywane treści. Najnowsze dane są oparte na wynikach wielu eksperymentów. Metodologia zastosowana w badaniach jest innowacyjna i wszystkie główne cele proponowanych badań zostały osiągnięte.

Kandydat do stopnia doktora charakteryzuje się wysokim poziomem wiedzy specjalistycznej. Załączone do rozprawy dokumenty Kandydat sporządził poprawnie. W dokumentach tych Doktorant przedstawił dotychczasowy dorobek publikacyjny, który moim zdaniem spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Ponadto zapoznałem się z dokumentem p.t. „Uzyskane efekty kształcenia dla kwalifikacji na poziomie 8 PRK” i stwierdzam, że ten dokument spełnia wymogi postępowania procesu nadawania stopnia doktora. Inne załączone dokumenty, w tym także życiorys naukowy Kandydata, są opracowane starannie według zasad przyjętych w postępowaniach doktorskich.

Uwagi krytyczne

W pracy zauważyłem kilka błędów literowych lecz ich liczba jest niewielka i nie mają praktycznie żadnego wpływu na czytelność pracy.

Wniosek końcowy

Wyrażone powyżej opinie o rozprawie doktorskiej Pana mgr inż. Macieja Badory jednoznacznie upoważniają mnie do stwierdzenia, że w świetle obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym stanowią one podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia doktora nauk technicznych. A zatem przedstawiam wniosek do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna, Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN o dopuszczenie Pana mgr inż. Macieja Badory do publicznej obrony.

