

## WYDZIAŁ ENERGETYKI I PALIW

Kraków, dn. 06.04.2023 r.

dr hab. inż. Rafał Buczyński, prof. AGH  
Katedra Technologii Paliw

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Robaka

pt. „*Optymalizacja parametrów dynamicznych kierownic turbin niskiego ciśnienia silnika turbowentylatorowego z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji*”

## PODSTAWA OCENY

Recenzję pracy doktorskiej wykonałem zgodnie z uchwałą Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej z dnia 16.02.2023 roku.

Przedstawiona dysertacja pana mgra inż. Rafała Robaka została wykonana w obszarze nauk technicznych, dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Wybrane przez doktoranta dyscypliny naukowe to inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz inżynieria mechaniczna. Tematyka pracy związana jest z opisem matematycznym i modelowaniem numerycznym rozkładu naprężeń w kierownicach turbiny niskiego ciśnienia oraz optymalizacją konstrukcji tych elementów. Optymalizację przeprowadzono za pomocą wybranych metod sztucznej inteligencji. Problemy poruszane w dysertacji są na

pograniczu inżynierii mechanicznej oraz inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. W związku z tym deklaracja interdyscyplinarności pracy jest bezsprzecznie uzasadniona.

## STRUKTURA/KONSTRUKCJA ROZPRAWY

Praca doktorska zawiera się w 103 stronach formatu A4. Część zasadnicza posiada 84 strony. Jest ona bogata w ilustracje (głównie wykresy, zdjęcia, schematy) oraz równania, 12 stron to: strona tytułowa, informacja o wsparciu firmy, spis treści, rysunków, tabel i oznaczeń. Tekst pracy zakończony jest 4a stronami bibliografii (47 pozycji), oraz streszczeniem w języku polskim i angielskim.

Większość umieszczonych w bibliografii artykułów, związanych jest z metodami sztucznej inteligencji, metodą elementów skończonych, optymalizacją kierownic oraz łopatek różnego rodzaju turbin. Wśród cytowanych pozycji znajduje się także 6-ś prac doktoranta: praca magisterska, 3y konferencyjne, 2a artykuły. Szczególnie ważna wydaje się pozycja:

*Robak R., Szczepanik M., Rulik S., Parametric Optimization of Nozzle Turbine Vane Modal Characteristics by Means of Artificial System. Applied Sciences. 2022; 12(19):9724 (pozycja 35)*

Czasopismo, w którym doktorant opublikował pracę charakteryzuje się wskaźnikiem IF: 2.838.

## ZAWARTOŚĆ CZĘŚCI ZASADNICZEJ

Część zasadnicza pracy „*Optymalizacja parametrów dynamicznych kierownic turbin niskiego ciśnienia silnika turbowentylatorowego z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji*” mieści się w 13u rozdziałach.

W rozdziale pierwszym (Wprowadzenie) doktorant przedstawia podstawowe zasady procesu konstruowania obiektów technicznych. Następnie przechodzi do tematu silników lotniczych oraz fazy prototypowania. Zauważa, że obecnie projektując silniki lotnicze, oprócz testów eksperymentalnych, korzysta się z metod numerycznych (symulacje, optymalizacje, sieci neuronowe). Doktorant wspomina o analizie modalnej, która służy do oceny kierownic turbin silników lotniczych. Wprowadzenie zawiera także cel dysertacji:

„...przedstawienie procesu optymalizacji charakterystyk modalnych kierownicy turbiny z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji na przykładzie algorytmów genetycznych (zawartych w komercyjnym oprogramowaniu Ansys) oraz immunologicznych rozszerzonych o autorskie procedury”

Pierwszy rozdział zakończony jest akapitem związanym z organizacją pracy.

Rozdział drugi (Cel i teza pracy) zawiera (ponownie) cel pracy:

1. Nadrzędny:

*„...wdrożenie w przemyśle nowych, innowacyjnych rozwiązań dla procesu projektowo-konstrukcyjnego. Zaproponowane rozwiązania zostaną odniesione do obecnego stanu wiedzy a przeprowadzone procesy optymalizacji będą miały na celu potwierdzenie skuteczności zaproponowanych rozwiązań w praktyce przemysłowej w branży lotniczej.”*

2. Główny:

*„...optymalizacja charakterystyk dynamicznych kierownicy turbiny w wyniku zmiany jej kształtu.”*

oraz tezę rozprawy:

*„Zastosowanie metod sztucznej inteligencji w zagadnieniach optymalizacji kierownic turbin niskiego ciśnienia, umożliwi dobór optymalnych parametrów układu dla przyjętych kryteriów optymalizacji we wczesnym etapie procesu projektowania.”*

Rozdział trzeci to opis analizowanej kierownicy turbiny gazowej. Rozdział ten zawiera schemat turbiny gazowej oraz umiejscowienie kierownic będących obiektem badań. Ponadto, pokazano zdjęcia oraz wyniki symulacji wspomnianych elementów. Umieszczone pola obciążeń termicznych i mechanicznych nie zawierają wartości a jedynie oznaczenia ekstermów. W dalszej części doktorant opisuje analizę modalną mającą na celu wyznaczenie charakterystyk (naprężeń) dynamicznych.

W rozdziale czwartym umieszczony jest krótki opis metod optymalizacji

- metody analityczne
- metody enumeratywne
- metody przeszukiwania czysto losowego

Druga część tego rozdziału to szczegółowy opis (wraz z równaniami) zasady działania algorytmów genetycznych oraz immunologicznych. Ta druga metoda została uzupełniona przez doktoranta o tzw. efekt kostymulacji. Dwie funkcje: Bohachevsky'ego oraz Ackley'a zostały wykorzystane do przetestowania szybkości wspomnianych algorytmów optymalizacyjnych.

Rozdział piąty zawiera opis metody elementów skończonych. Ponadto, doktorant przedstawia tutaj rodzaje naprężeń i odkształceń w elementach tarczowych i osiowosymetrycznych analizowanego modelu.

Rozdział szósty to sformułowanie procesu optymalizacji poprzez definicje funkcji celu (J1 – minimalizacja powierzchni łopatek, J2, J3 – maksymalizacja częstotliwości

drgań własnych, J4 – wprowadzenie funkcji kary, ograniczenia związanego z częstotliwością drgań własnych).

W rozdziale siódmym przedstawiono model zastępczy (metamodel, uproszczony), który wykorzystywany jest do szybkich symulacji w procesie optymalizacji. Doktorant wymienia tu trzy możliwe podejścia:

- model matematyczny
- model w oparciu o pasywny eksperyment
- model w oparciu o aktywne planowanie eksperymentu

Autor dysertacji wybrał do swoich analiz 3e podejście wraz z agregacją metamodeli.

Rozdział ósmy zawiera opis modelu numerycznego wykorzystywanego w procesie optymalizacji. Ponadto, pokazano analizowaną geometrię: obudowa turbiny, platforma górna i dolna, profil aerodynamiczny, uszczelnienie. Zbadano wpływ gęstości siatki oraz sztywności kontaktu, utwierdzenia na częstotliwość drgań własnych modelu.

Rozdział dziewiąty to analiza wrażliwości parametrów geometrycznych, którą przeprowadzono za pomocą współczynników korelacji Pearsona oraz Spearmana. Analiza wskazuje na dominujący wpływ grubości powłoki obudowy na częstotliwość drgań własnych oraz na powierzchnię modelu.

Rozdział 10 to ogólne przedstawienie środowiska wykorzystanego do przeprowadzenia optymalizacji. Analizy zostały wykonane za pomocą środowiska Ansys.

Rozdział 11 i 12 zawierają opis oraz analizę wyników optymalizacji genetycznej i immunologicznej. Doktorant pokazuje tutaj szereg wykresów i tabel obrazujących możliwości i wydajność analizowanych modeli optymalizacyjnych.

Zasadniczą część dysertacji kończy rozdział 13: Podsumowanie i wnioski końcowe. W tej części doktorant przekonuje, że wprowadzone przez niego modyfikacje modelu immunologicznego (wprowadzenie kostymulacji) przyspiesza proces analizy zmniejszając liczbę wywołań funkcji celu.

## OPINIA O PRACY

Tematyka pracy doktorskiej Pana mgr inż. Rafała Robaka jest interdyscyplinarna. Zawiera w sobie elementy inżynierii mechanicznej oraz inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. Doktorant stosuje Metodę Elementów Skończonych (MES) do wyznaczenia naprężeń i odkształceń w kierownicach turbin niskiego ciśnienia. Ponadto, wykorzystuje wybrane metody optymalizacji: genetyczną i immunologiczną do obniżenia masy kierownicy, jak również do przesunięcia częstotliwości drgań własnych analizowanego

modelu poza zakres przewidywanej pracy turbiny. Wszystko to ma pomóc w procesie projektowania i prototypowania turbin.

Metodologia opracowana przez doktoranta opiera się na komercyjnym pakiecie ANSYS oraz pewnym autorskim modyfikacjom. W Opinii doktoranta modyfikacje te poprawiają proces poszukiwania najlepszych rozwiązań poprzez zmniejszenie liczby wywołań funkcji celu.

Według opinii recenzenta opisane w dysertacji algorytmy, jak również ewentualne przyszłe ich modyfikacje, które opracowane zostaną w oparciu o użyteczne informacje zawarte w tej pracy pozwolą opracować doskonałe narzędzie do projektowania obiektów technicznych.

Od strony edytorskiej tekst jest przygotowany starannie. Napisany jest w sposób logiczny i poprawnie językiem technicznym. Konstrukcja dysertacji jest również poprawna choć można by ją zoptymalizować i poprawić czytelność.

## UWAGI KRYTYCZNE

Według recenzenta ogólna ocena pracy doktorskiej pana Rafała Robaka jest bezsprzecznie pozytywna. Praca posiada jednak pewne niedoskonałości a obowiązkiem recenzenta jest je wskazać i w recenzji opisać. Z tego też powodu wymieniam niektóre z nich:

1. Str.15: praca składa się z 13 rozdziałów a nie 12
2. Cel pracy jest przedstawiony w rozdziale pierwszym oraz drugim. Co więcej, różni się nieco od siebie w obu wymienionych miejscach. Jaki jest ostatecznie cel dysertacji?
3. W rozdziale drugim doktorant twierdzi, że jego podejście do optymalizacji kierownicy turbiny jest nowe, co potwierdza przegląd literaturowy. Jak wygląda standardowa procedura optymalizacji? Jakie są różnice?
4. Str.17, wiersz 8: jest: „...ilość stopni swobody ...” a powinno być „liczba stopni swobody”
5. Str.19, wiersz 2: jest „... nie podlega działaniu sile odśrodkowej ..” a powinno być „... nie podlega działaniu siły odśrodkowej ..”
6. Str.19, wiersz 6: jest „Konstrukcja kierownicy jest zadaniem multidyscyplinarnym ... a powinno być „Konstruowanie kierownicy jest zadaniem multidyscyplinarnym ....”
7. Str.19, wiersz 13: jest „...optymalizuje się głównie...” a powinno być „... optymalizuje się głównie...”
8. Str.21, równanie 3.1: brak definicji  $f_1$ . Pojawia się ona w dalszej części pracy
9. Str.22, rys. 9 i 10: brak legendy i wyjaśnienia znaczenia kolorów.
10. Str.27, pierwszy akapit. Być może warto na końcu akapitu umieścić cytowanie.

11. Str.27, rys. 16.: nie wyjaśniono znaczenia liter A, B, C. Niejasny opis rysunku w tekście.
12. Str.36, równanie 4.6. Zamiast c powinno być C?
13. Str.39, rysunek 25: ko-stymulacji czy kostymulacji?
14. Str.42-43: dlaczego analizowane są obie funkcje to znaczy: Auckleya i Bochaczewskiego?
15. Str.48, równanie 5.13: dlaczego do analizy wybrano wielomiany pierwszego rzędu? Czy porównano wyniki uzyskiwane dla wielomianów drugiego rzędu?
16. Str.42-43: Czy liczba wywołań to najlepsze kryterium oceny efektywności algorytmu? Co jeśli pojedyncze wywołanie z kostymulacją jest bardziej czasochłonne? Może czas obliczeń byłby dobrym kryterium?
17. Str.57, równanie 6.6: czy 125 to graniczna częstotliwość drgań własnych?
18. Str.62, równanie 7.8: co oznaczają wykorzystane indeksy „i” i „j”?
19. Str.63 Skąd wzięły się ustawienia algorytmu immunologicznego?
20. Str.66 rysunek 42: przydałby się jeszcze jeden przypadek o większej gęstości siatki. Obecnie trudno ocenić, czy częstotliwość się jeszcze nie zmieni.
21. Str.66 Dlaczego doktorant korzysta z jednostek spoza układu SI?
22. Str.71 pierwszy akapit: przydało by się cytowanie?
23. Str.72, rysunek 50: W jaki sposób sporządzono wykres? Za pomocą Ansysa?
24. Str.73-74 przydałoby się więcej informacji nt. własnego algorytmu ... W jaki sposób go zaimplementowano?
25. Str.76 ostatni wiersz: jest „(powierzchna modelu)” powinno być „(powierzchnia modelu)”.
26. Str.79, tabela 12: czym są oznaczenia C1, C2, C3?
27. Str.80, tabela 13: jest „... ilość wywołań ...” powinno być „liczba wywołań”
28. Str.91, tabela 18: Brak wyjaśnienia oznaczenia LWFC
29. Dlaczego nie opisano siatki modelu? Jakiego rodzaju ona jest i jakości?
30. Czy zawarte analizy odnoszą się do przypadku „na zimno”?
31. Jak wpłyną naprężenia termiczne na uzyskiwane w tej pracy wyniki?
32. Jak wpłynie modyfikacja kierownicy na sprawność/działanie turbiny?
33. Czy nie warto by było zasymulować pracę turbiny o konstrukcji początkowej i końcowej?
34. Czy zwalidowano uzyskane wyniki? Czy naprawdę modyfikacje są optymalne?
35. Czy podano dane materiałowe? Jak się zmieniają wraz ze wzrostem temperatury?

W mojej opinii rozprawa odpowiada wymogom określonym w art.13 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U.2003.65.595 z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie pana mgr inż. Rafała Robaka do dalszego postępowania w ramach przewodu doktorskiego.

Rafał Buczajski