

Gdańsk 20.04.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Robaka wykonana na zlecenie
Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka
Politechniki Śląskiej (pismo RIE/BD.512.11.2023)**

1. Wstęp.

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Robaka pt. „Optymalizacja parametrów dynamicznych kierownic turbin niskiego ciśnienia silnika turbowentylatorowego z wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji” jest pracą interdyscyplinarną z zakresu Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki oraz Inżynierii Mechanicznej. Praca została wykonana w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” przy Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej pod kierunkiem dr. hab. inż. Sebastiana Rulika (opiekuna naukowego z dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka) oraz dr. hab. inż. Mirosława Szczepanika (opiekuna naukowego z dyscypliny Inżynieria Mechaniczna). Rozprawa doktorska liczy 103 strony, zawiera spis treści, rysunków, tabel i oznaczeń, 13 rozdziałów, bibliografię oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Optymalizacja konstrukcji oraz pracy turbin gazowych stosowanych w silnikach lotniczych prowadzi do znacznych korzyści energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych i jest aktualnym multidyscyplinarnym problemem badawczym z zakresu inżynierii mechanicznej i energetyki. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Robaka poświęcona jest analizie statycznej i dynamicznej oraz optymalizacji kształtu elementu turbiny gazowej wysoko obciążonej, jakim jest łopátka kierownicza i jej zamocowanie w obudowie.

Na wstępie pracy, w rozdziale 1 Autor w sposób zwięzły wprowadza czytelnika w problematykę projektowania i analizy przepływowej, cieplnej, mechanicznej i modalnej maszyn i urządzeń energetycznych. Cel pracy zdefiniowany jest w rozdziale 2 – jest nim optymalizacja charakterystyk dynamicznych łopatek kierowniczych turbiny gazowej poprzez zmianę kształtu kierownicy i jej zamocowania w obudowie turbiny. Cel ten zostanie osiągnięty poprzez realizację szeregu zadań cząstkowych, między innymi poprzez opracowanie i implementację własnego algorytmu immunologicznego z efektem kostymulacji. Postawiono także tezę, że zastosowanie metod sztucznej inteligencji do optymalizacji kierownic umożliwia dobór optymalnych parametrów układu dla przyjętych kryteriów optymalizacji.

Rozdział 3 stanowi opis przedmiotu badań wraz z przybliżeniem problematyki przepływu, naprężeń i charakterystyk dynamicznych. Rozdział 4 poświęcony jest optymalizacji funkcji celu z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji. Rozważane są

metody deterministyczne (gradientowe), stochastyczne i hybrydowe. Szczegółową uwagę poświęcono algorytmom stosowanym w pracy, tj. algorytmom genetycznym i algorytmom immunologicznym, łącznie z autorską odmianą algorytmu immunologicznego z kostymulacją. Pokazano na przykładzie funkcji testowych, że algorytm z kostymulacją charakteryzuje się lepszą efektywnością wyszukiwania rozwiązań, choć odbywa się to jednak kosztem dokładności poszukiwania ekstremum globalnego.

W rozdziale 5 przedstawiono metodę elementów skończonych dla wyznaczenia pól odkształceń i naprężeń w elementach turbiny z uwzględnieniem modelu kontaktu. W rozdziale 6 przedstawiono sformułowanie zagadnienia optymalizacji badanego układu jako poszukiwanie ekstremum funkcji celu w kilku postaciach:

- minimum powierzchni modelu przy ograniczeniach w postaci charakterystyk dynamicznych kierownicy, w tym przy założeniu minimalnej wartości lub funkcji kary dla częstotliwości drgań własnych,
- lub maksimum częstotliwości drgań własnych przy ograniczonej liczbie parametrów geometrycznych (bez zmian grubości obudowy).

Z kolei w rozdz. 7 opisano model aproksymujący (metamodel), zastępujący kosztowne obliczenia numeryczne 3D lub 2D. Model ten zbudowano posługując się planowaniem eksperymentu Box-Wilson oraz agregacją metamodeli. Zastosowany model zastępczy skutecznie zweryfikowano na wybranej funkcji testowej. Model stosowano w procesie optymalizacji, a po otrzymaniu rozwiązania optymalnego przeprowadzano weryfikację modelem MES.

Ważną częścią pracy jest rozdz. 8, w którym zbudowano i opisano model MES kierownicy i fragmentu obudowy turbiny, przedstawiono geometrię zamocowania i kontaktu. Zdefiniowano szereg cech geometrycznych badanego obiektu, takie jak grubości powłok obudowy, pozycje, pochylenia i grubości zaczepów kierownic. W rozdziale tym (jak i w rozdziale 9) przeprowadzono badania wpływu parametrów geometrycznych i sztywności kontaktu na częstotliwość drgań własnych i energię odkształcenia dla pierwszej częstotliwości drgań własnych. Przeprowadzono także analizę wrażliwości modelu MES ze względu na rozdzielczość siatki obliczeniowej (dla częstotliwości drgań własnych).

Rozdział 10 stanowi opis środowiska optymalizacji i komunikacji pomiędzy własnym algorytmem immunologicznym oraz środowiskiem Ansys Workbench. W rozdziałach 11 i 12 przedstawiono otrzymane wyniki optymalizacji kształtu badanego obiektu z wykorzystaniem algorytmu genetycznego i immunologicznego dla kilku wcześniej zdefiniowanych funkcji celu. Dla funkcji J_1 i J_4 algorytmy zrealizowały redukcję powierzchni modelu, ale dopiero po osiągnięciu żądanego poziomu częstotliwości drgań własnych. Dla funkcji J_2 i J_3 algorytmy osiągnęły wzrost częstotliwości drgań własnych, ale poniżej żądanego poziomu 125 Hz, wydaje się z uwagi na brak możliwości zmiany grubości obudowy. Jak wynika z tabeli 18, niższe wartości powierzchni dla żądanego poziomu częstotliwości drgań własnych uzyskano z pomocą algorytmów immunologicznych, i co ważne przy mniejszej liczbie wywołań funkcji celu w porównaniu z algorytmem genetycznym. Stwierdzono, że spośród parametrów geometrycznych najistotniejszy wpływ posiadają grubości obudowy oraz grubości, miejsca zamocowania i pochylenia zaczepów łopatek kierowniczych.

Rozdz. 13 zawiera podsumowanie skupiające się na otrzymanych wynikach pracy i oryginalnych elementach badań. Zawiera też rekomendację do dalszych badań w zakresie optymalizacji konstrukcji w kierunku rozszerzenia algorytmu immunologicznego i zwiększenia liczby zmiennych decyzyjnych.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Doktorant zrealizował postawiony w pracy cel, czyli optymalizację charakterystyk dynamicznych kierownic turbiny gazowej oraz udowodnił postawioną w pracy tezę. Doktorant rozwiązał samodzielnie oryginalny multidyscyplinarny problem naukowy. Otrzymał wartościowe rezultaty, które wnoszą istotny wkład do inżynierii mechanicznej i energetyki. Autor opracował przy tym własne narzędzie optymalizacyjne - oryginalny zaawansowany algorytm immunologiczny i wskazał na jego przewagę w stosunku do algorytmów stosowanych w literaturze.

W wyniku przeprowadzonej optymalizacji numerycznej Doktorant uzyskał nowe geometrie kierownic i ich zamocowań w obudowie o lepszej charakterystyce dynamicznej, co stanowi dużą wartość użytkową. Oprócz konkretnych geometrii Doktorant dostarczył konstruktorom turbin wiedzy, jak kształtować badane elementy turbiny. Tak więc Autor z powodzeniem wypełnił też nadrzędny cel przyświecający pracom doktorskim wykonywanym w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy” jakim jest opracowanie innowacyjnego rozwiązania technicznego przeznaczonego do wdrożenia w przemyśle.

Praca jest zredagowana zwięźle, lecz nie do końca starannie. Składa się z krótkich rozdziałów, co nie jest zarzutem. Ale można oczywiście w przyszłej publikacji zastanowić się nad połączeniem treści z niektórymi krótkimi rozdziałami, ale także nad zmianą kolejności, czyli przegrupowaniem przedstawianych treści. Dla niniejszego recenzenta, najbardziej odpowiednim ciągiem logicznym byłby po rozdz. 1 i 2 - rozdz. 3, 5, 8, 9, następnie 6, 4, 7, 10, następnie 11, 12.

Opis kluczowych zagadnień w ramach przyjętej problematyki badawczej przedstawiony w rozdz. 3 pozostaje zwięzły i poprawny. Pewne informacje, takie jak rozkłady naprężeń, obciążeń termicznych czy postacie modalne, między innymi te zobrazowane na przedstawionych w rozdziale rysunkach pozostają niedookreślone poprzez brak konkretnych wartości liczbowych, ale przyjmuję, że ujawnienie ich byłoby złamaniem zasad poufności.

Rozdz. 4 jest bardzo informacyjny - zawiera szereg informacji i praktycznych koncepcji związanych z realizacją algorytmów genetycznych i immunologicznych. Czytelnik zapoznaje się z w szczególności z bogatą terminologią immunologiczną. Być może warto byłoby terminologię tę, jak i związaną z algorytmami genetycznymi zebrać w postaci słowniczka i umieścić razem ze spisem oznaczeń. Spis oznaczeń jest z kolei zbyt krótki i nie zawiera wielu kluczowych oznaczeń.

Edycja wzorów raczej nie budzi zastrzeżeń. Szczególnie rozdział 5 zawiera pokaźną liczbę wzorów do metody elementów skończonych. Przygotowane one zostały bardzo solidnie. Niniejszy recenzent nie dopatrzył się uchybień w samych wzorach, ani w oznaczeniach wielkości fizycznych. Jednakże wzory czytane są razem z tekstem; wymagane jest zatem stosowanie ogólnych zasad interpunkcji.

Wyniki obliczeń są należycie ilustrowane. Opracowanie graficzne rysunków i tabel w zdecydowanej większości nie budzi zastrzeżeń.

Dobór cytowań jest także właściwy, choć spis literatury nie jest zbyt długi.

Praca napisana jest przy użyciu poprawnej i zaawansowanej terminologii. Można mieć uzasadnione zastrzeżenia do staranności edycji tekstu – brakuje ostatniego proof-readingu, który pozwoliłby wyeliminować dość liczne jednak literówki, ominięte spójniki lub przymyki i niegramatyczne sformułowania. Niegramatyczne sformułowania można nawet zauważyć na wewnętrznej stronie tytułowej. Jest także dużo tzw. skrótów myślowych, które wymagają korekty i zwiększenia precyzji sformułowania, np.

- na str. 41 „...rokuje na rozwiązanie”,

- na str. 43 „...lepsze o 29% ekstremum globalne”,
- podpis pod rys. 54 i następnymi rysunkami – „Funkcja celu J_1 - ”, lepiej byłoby „Wyniki optymalizacji funkcji celu J_1 - ...”.
- str. 54 - pierwsze zdanie,
- str. 94 - pierwsze zdanie,
- ostatnie zdanie na str. 17 stanowi duże przejęzyczenie.

Abstrakt w języku angielskim jest napisany bardzo niepoprawnym językiem i wymaga kompleksowej korekty.

4. Wniosek końcowy.

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym i stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Problematyka pracy mieści się w zakresie ważnego kierunku badań prowadzonych w wiodących ośrodkach naukowych w kraju i za granicą. Autor wykazał się dużą wiedzą w zakresie inżynierii mechanicznej i energetyki. Zamieszczone w recenzji uwagi krytyczne dotyczą w zasadzie warstwy redakcyjnej rozprawy. Nie podważają wysokiej oceny rozprawy oraz nie rzutują na jej podstawowe walory, jakimi są samodzielne rozwiązanie trudnego multidyscyplinarnego zagadnienia badawczego, oryginalność wyników oraz ich duża wartość użytkowa.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Robaka spełnia wymagania dla prac doktorskich zapisane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, oraz wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Podpisał Piotr Lampart