

Warszawa, 02.05.2023

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgra inż. Rafała Robaka

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

1. Uwagi ogólne

Rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Robaka jest poświęcona zagadnieniom optymalizacji charakterystyk modalnych oraz masy kierownicy turbiny przy zastosowaniu algorytmów genetycznych (AG) i immunologicznych (AI).

Podjęcie tej tematyki badawczej należy uznać za ciekawe i trafne z dwóch powodów: (i) zastosowano algorytmy optymalizacji mające inspirację biologiczną, stąd zaliczenie ich do metod sztucznej inteligencji, (ii) podjęto udaną próbę użycia tych algorytmów do optymalizacji kierownicy turbiny względem parametrów geometrycznych kierownicy.

Biorąc pod uwagę cel i zakres merytoryczny rozprawy, warto zauważyć, że ma ona charakter interdyscyplinarny, ponieważ porusza sprawy z pogranicza energetyki, mechaniki obliczeniowej oraz informatyki technicznej i dlatego można ją z całą pewnością zakwalifikować jako rozprawę interdyscyplinarną, leżącą głównie pomiędzy dyscypliną **inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka** oraz **inżynieria mechaniczna**.

W związku z tym, że rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, dwóch promotorów w osobach: dr. hab. inż. Sebastiana Rulika, prof. PŚ, reprezentującego dyscyplinę inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka i dr. hab. inż. Mirosława Szczepanika, prof. PŚ, reprezentującego dyscyplinę inżynieria mechaniczna, jest jak najbardziej zasadne.

Rozprawa została wykonana przy istotnym wsparciu firmy Avio Polska Sp. Z o.o. Wsparcie to dotyczyło zarówno udostępnienia danych wejściowych jak i udostępnienia zarówno sprzętu komputerowego jak i oprogramowania komercyjnego.

2. Zakres rozprawy

Rozprawa zawiera 103 strony. Składa się ze spisu treści, spisu rysunków, tabel i oznaczeń, 13. rozdziałów, bibliografii oraz streszczeń w j. polskim i angielskim.

Rozdział 1. ma charakter wprowadzenia i zawiera zwięzłe, syntetyczne informacje dotyczące zagadnień związanych z tematem rozprawy oraz przegląd treści rozprawy.

Cel i teza rozprawy przedstawione są w rozdziale 2.

Rozdział 3. poświęcony jest opisowi przedmiotu optymalizacji – kierownicy turbiny gazowej. W rozdziale 4. Doktorant omówił dwa algorytmy optymalizacji, które zastosował w rozprawie, a mianowicie algorytmy genetyczne i immunologiczne.

Podstawowe informacje dotyczące metody elementów skończonych (MES) przedstawił Doktorant w rozdziale 5.

Rozdział 6. zawiera sformułowanie zagadnienia optymalizacji kierownicy turbiny gazowej.

Koncepcję metamodelu przedstawił Doktorant w rozdziale 7.

Rozdział 8. zawiera opis modelu numerycznego.

Zagadnienie analizy wrażliwości częstości drgań własnych oraz pola powierzchni modelu dwuwymiarowego na zmianę parametrów geometrycznych przedstawione jest w rozdziale 9.

Rozdział 10. poświęcony jest opisowi środowiska optymalizacji.

Rozwiązanie zagadnienia optymalizacji przy wykorzystaniu algorytmu genetycznego przedstawione jest w rozdziale 11.

Rozdział 12. zawiera wyniki optymalizacji otrzymane za pomocą algorytmu immunologicznego.

Podsumowanie uzyskanych wyników znajduje się w rozdziale 13.

Bibliografia zawiera 47 pozycji literaturowych, w tym 6 pozycji jest autorstwa lub współautorstwa Doktoranta.

3. Ocena merytoryczna

Oceniana rozprawa doktorska poświęcona jest ważnej i aktualnej problematyce badawczej związanej z opracowaniem i zastosowaniem metodologii optymalizacji parametrycznej kierownic turbin z wykorzystaniem dwóch algorytmów sztucznej inteligencji, a mianowicie AG i AI.

Tytuł rozprawy jest nieprecyzyjny. Przedstawiona w rozprawie „*Optymalizacja parametrów dynamicznych....*”, przeprowadzona została ze względu na kryterium minimalizacji pola powierzchni oraz maksymalizacji pierwszej częstości drgań własnych, natomiast w rozprawie nie wyjaśniono co kryje się pod pojęciem *parametrów dynamicznych*, a sam proces optymalizacji został przeprowadzony względem parametrów geometrycznych (por. Tabela 8 i Tabela 9).

Doktorant stawia tezę (str. 16), że:

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

Teza pracy jest zbyt ogólnikowa ponieważ nie wiadomo o jakich metodach sztucznej inteligencji jest mowa, a z faktu, że ich zastosowanie coś umożliwia nie wynika na czym ma polegać korzyść i zaleta ich zastosowania do optymalizacji kierownic turbiny.

Zagadnienie drgań własnych kierownicy turbiny sformułowane zostało za pomocą skończenie wymiarowej dyskretyzacji kierownicy z użyciem MES. Doktorant sprowadził rozwiązanie zagadnienia analizy modalnej kierownicy do zadania dwuwymiarowego. Aby zminimalizować pracochłonne obliczeniowo rozwiązywanie zagadnienia własnego dla każdego kroku optymalizacji, Doktorant sformułował metamodel oparty na planie Box-Wilsona.

Doktorant przyjął cztery kryteria optymalizacji:

- minimum pola powierzchni J_1 (6.1) z warunkiem ograniczającym nałożonym na pierwszą częstość drgań własnych O_1 , dla 10. zmiennych projektowych X_A ,
- maksimum częstości drgań własnych J_2 (6.3) dla 7. zmiennych projektowych X_B ,
- maksimum częstości drgań własnych J_3 (6.4) dla 4. zmiennych projektowych X_C ,
- minimum pola powierzchni J_4 (6.5) połączonego z funkcją kary (6.6) dla 10. zmiennych projektowych X_A .

Doktorant nie wyjaśnia czym różni się minimalizacja J_1 przy ograniczeniu O_1 od minimalizacji J_4 z funkcją kary (6.6). Nie jest także jasne dlaczego Doktorant ograniczył liczbę zmiennych projektowych przy maksymalizacji J_2 i J_3 i nie sformułował warunków ograniczających przy zastosowaniu tych funkcji celu.

Warto zauważyć, że minimalizacja pola powierzchni dla modelu dwuwymiarowego w postaci tarczy o grubości h , przy jednostkowej gęstości materiału jest równoznaczna z minimalizacją masy.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta należy zaliczyć:

- sformułowanie zagadnienia własnego w kategoriach metody elementów skończonych (MES), a następnie zbudowanie metamodelu kierownicy turbiny,
- sformułowanie zagadnienia optymalizacji kierownicy poprzez zaproponowanie czterech funkcji celu, warunków ograniczających oraz wyspecyfikowanie geometrycznych zmiennych projektowych,
- przeprowadzenie procesu optymalizacji za pomocą algorytmu genetycznego,
- oprogramowanie algorytmu immunologicznego i przeprowadzenie za jego pomocą procesu optymalizacji przy zastosowaniu zjawiska kostymulacji,
- szczegółowa analiza otrzymanych wyników oraz opracowanie wniosków.

Symulacje komputerowe przeprowadzone zostały przy użyciu komercyjnego oprogramowania MSC.Ansys dla rozwiązania zagadnienia własnego oraz optymalizacji genetycznej, a także przy użyciu własnego oprogramowania dla optymalizacji immunologicznej.

Zamieszczone w rozprawie wyniki badań świadczą o dobrej znajomości problematyki badawczej i pomysłowości Doktoranta.

Struktura rozprawy jest logiczna i racjonalnie przemyślana, chociaż w rozprawie jest wiele nieprecyzyjnych pojęć i sformułowań.

Warto także zauważyć, że pierwszą pracą dotyczącą zastosowania jednej z metod sztucznej inteligencji w postaci algorytmu ewolucyjnego do jedno- i wielokryterialnej optymalizacji kształtu łopatkę turbiny przygotował dr Witold Grela w 2006 [18]. Jego rozprawa doktorska została także wykonana przy wsparciu firmy Avio Polska Sp. Z o.o.

Uwagi dyskusyjne

- i. W całej rozprawie Doktorant myli pojęcie powierzchni z polem powierzchni. Powierzchnia jest zbiorem punktów geometrycznych o pewnej własności i może być traktowana jako przestrzenny odpowiednik krzywej. W rozprawie Doktorant zajmuje się minimalizacją pola powierzchni, co przy jednostkowej gęstości materiału jest równoważne minimalizacji masy.
- ii. Tytuł rozdziału 9. jest mylący, ponieważ Doktorant nie badał wrażliwości parametrów geometrycznych, jak sugeruje tytuł rozdziału, ale analizował numerycznie wrażliwość częstości drgań własnych na zmianę parametrów geometrycznych. Warto dodać, że w literaturze przedmiotu jest wiele prac dotyczących analizy wrażliwości częstości drgań własnych.
- iii. Ponieważ zmienne decyzyjne są policzalne (w pracy jest ich maksymalnie 10), więc powinny być określone przez liczbę, a nie ilość jak pisze Doktorant na str. 71 i 76.
- iv. Doktorant formułuje kilka funkcji celu i dla każdej z nich zajmuje się optymalizacją jednokryterialną. Czy zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej, np. dwukryterialnej polegającej na jednoczesnej minimalizacji pola powierzchni i maksymalizacji pierwszej częstości drgań własnych, nie poszerzyłoby zakresu rozwiązywanego zagadnienia?
- v. Doktorant formułuje zagadnienie optymalizacji ze względu na maksymalizację pierwszej częstości drgań własnych. Otwartym pytaniem może być znajomość wyższych częstości drgań własnych, np. drugiej i trzeciej, zwłaszcza w przypadku, gdy maksymalizuje się pierwszą częstość drgań własnych. Wtedy istotnym kryterium optymalizacji może być także rozsuniecie (powiększenie) różnicy pomiędzy sąsiednimi wartościami drgań własnych, np. między pierwszą i drugą częstością drgań oraz/lub uniknięcie powtarzających się częstości drgań własnych (*multiple eigenvalues*). W rozprawie nie ma żadnego komentarza w tej sprawie.
- vi. Doktorant używa takich niezdefiniowanych i niejasnych pojęć jak „*model dokładny*” (str. 16, str. 95), „*rzeczywisty model*” (str. 58), które są niejasne i mylące. Model jest zawsze tylko przybliżeniem rzeczywistego obiektu lub procesu, a zagadnienie modelowania polega na przyjęciu w pierwszym etapie pewnych fizycznych założeń upraszczających, dotyczących materiału, geometrii oraz warunków brzegowych, których efektem końcowym jest model fizyczny. Model matematyczny jest opisem modelu fizycznego w kategoriach matematycznych.
- vii. Doktorant opisując metodę elementów skończonych pisze, że wykorzystuje „*technikę kontaktu*” (str. 55²). Co to jest technika kontaktu? Zastosowane w rozprawie skończone elementy kontaktowe wykluczają relatywne przesunięcia powierzchni w kierunku

stycznym. Jest to równoznaczne z przyjęciem modelu kontaktu bez tarcia, a więc jest pewnym założeniem o charakterze fizycznym w procesie modelowania.

- viii. Doktorant do rozwiązania zagadnienia optymalizacji stosuje dwa algorytmy: AG i AI. Który algorytm optymalizacji zdaniem Doktoranta lepiej nadaje się do rozwiązania sformułowanego w rozprawie zadania optymalizacji?

4. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Robaka poświęcona jest ambitnemu zagadnieniu optymalizacji geometrii kierownicy turbiny niskiego ciśnienia silnika turbowentylatorowego ze względu na kryterium maximum pierwszej częstości drgań własnych oraz kryterium minimum pola powierzchni kierownicy, które jest równoważne minimalizacji masy kierownicy. Do rozwiązania zagadnienia optymalizacji, Doktorant zastosował dwie metody sztucznej inteligencji: algorytm genetyczny (AG) oraz algorytm immunologiczny (AI), oparty na sztucznych systemach immunologicznych.

Uzyskane wyniki numeryczne optymalizacji znajdują zastosowanie w projektowaniu postaci konstrukcyjnej kierownic. Zamieszczone w rozprawie wyniki optymalizacji świadczą o dobrym rozeznaniu Doktoranta w obszarze objętym rozprawą.

Główny cel rozprawy polegający na wykazaniu, że AG i AI są skutecznymi metodami optymalizacji ze względu na kryteria częstotliwościowe oraz pole powierzchni, względem geometrycznych zmiennych decyzyjnych, pozwala na racjonalne dobranie parametrów geometrycznych kierownic.

Doktorant wykazał się dużą wiedzą i doświadczeniem oraz posiada istotny i wartościowy dorobek publikacyjny.

Biorąc pod uwagę przedstawioną opinię stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Robaka odpowiada wymogom stawianym rozprawom doktorskim.

Doktorant jest dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

W związku z tym uważam, że przedstawiona praca spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim przez obecnie obowiązującą ustawę – prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka Politechniki Śląskiej.

Tadeusz Burczyński