

Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Rafała Muchowskiego  
pt.

„Design and optimization of an axial compressor with use of multi-Fidelity approach”

wykonana na zlecenie Prorektora ds. nauki Politechniki Rzeszowskiej  
im Ignacego Łukasiewicza

na podstawie uchwały Rady Dyscypliny „Inżynieria Mechaniczna” z dn. 22.11.2023 r.

W ostatnich latach optymalizacja stała się bardzo popularnym narzędziem udoskonalenia różnego rodzaju rozwiązań zarówno technicznych jak i wychodzących poza tę dziedzinę. Zastosowanie optymalizacji daje widoczną poprawę efektywności działania różnych urządzeń jak i złożonych procesów technologicznych, jednak wiąże się często z wykonaniem szeregu złożonych obliczeń, które muszą być wielokrotnie powtarzane, ze względu na iteracyjny charakter obliczeń w algorytmach optymalizacji. Generuje to znaczny koszt obliczeniowy, zwłaszcza w przypadku gdy pojedynczy przypadek wymaga złożonych obliczeń, np. analizy przepływów metodami CFD czy analizy strukturalnej z użyciem MES.

Pomimo ciągle zwiększającej się mocy obliczeniowej współczesnych komputerów, opracowanie sprawniejszych algorytmów jest nadal istotnym problemem. W problemach, gdzie mamy do czynienia ze złożonymi analizami CFD istotnym zagadnieniem poprawiającym wydajność metod optymalizacji jest zastosowanie modeli obliczeniowych o tak dobranej wierności, aby zachować balans między dokładnością a kosztem obliczeń. Praca doktorska mgr inż. Rafała Muchowskiego przedstawia zastosowanie metodyki Multi-Fidelity do optymalizacji ośmiostopniowej wysokociśnieniowej sprężarki osiowej silnika turbinowego w szerokim zakresie operacyjnym. Ponieważ w zagadnieniach projektowania sprężarek osiowych istnieje szereg ograniczeń związanych z w/w metodyką, dotyczących zarówno zastosowania metodyki Multi-Fidelity jak i możliwości predykcji obszaru pracy statecznej, celem pracy było opracowanie takiej koncepcji metodyki aby możliwe było rozszerzenie obszaru projektowego przy zachowaniu wystarczającej wierności. Aby zademonstrować możliwości tej metody, wybrano nowoczesną, 8-stopniową osiową sprężarkę wysokociśnieniową, w której układ łopatek prowadzących został zoptymalizowany przy użyciu podejścia Multi-Fidelity, a

następnie zweryfikowany za pomocą reprezentacji zoptymalizowanego elementu o wysokiej wierności.

Uważam, że temat rozprawy jest aktualny, zarówno z technicznego oraz badawczego punktu widzenia oraz istotny w procesie projektowania nowych układów wirujących silników lotniczych.

Rozprawa podzielona jest na 7 rozdziałów wliczając wstęp, podsumowanie i wnioski oraz spis literatury. Wstęp, wnioski końcowe, elementy nowości oraz kierunki dalszych prac zostały zapisane w odrębnych podrozdziałach, co znacząco wpływa na czytelność pracy. Praca jest zapisana na 143 stronach. W pracy zamieszczono 86 rysunków oraz 31 tablic z danymi i wynikami obliczeń. Bibliografia zawiera 61 pozycji, gdzie większość to pozycje aktualne, pozostałe są pozycjami klasycznymi w dziedzinie. Rozprawa została napisana w jęz. angielskim.

W Rozdz.1 (Introduction) dokonano wprowadzenia w zagadnienie projektowania sprężarek wysokociśnieniowych współczesnych silników turbinowych. Przedstawiono motywację podjęcia tematu, w tym zmniejszenie emisji CO<sub>2</sub>, zmniejszenie zużycia paliwa oraz hałasu przez nowoczesne, optymalnie zaprojektowane silniki lotnicze.

W Rozdz.2 (Literature review) dokonano przeglądu literatury dotyczącej technik modelowania i projektowania maszyn przepływowych. Zasygnalizowano, między innymi, kwestie stosowania metody „Streamline Curvature Method” (SCM). Przedstawiono problem optymalizacji z zastosowaniem metod małej i wysokiej wierności oraz dotychczasowe podejście stosowania metodyki Multi-Fidelity. Zwrócono uwagę na brak badań dotyczących wrażliwości metod CFD dla modeli sprężarek osiowych uwzględniających wtórne objętości przepływu.

W Rozdz.3 (Thesis, objective and scope of work) przedstawiono luki w aktualnym stanie wiedzy prowadzące do sformułowania celów badawczych oraz finalnego celu jakim było opracowanie metodologii umożliwiającej optymalizację typu Multi-Fidelity dla szerokiego zakresu pracy sprężarek osiowych na przykładzie wielostopniowym, zapewniających zwiększone możliwości szacowania wydajności przy uwzględnieniu wymagań dotyczących stabilności oraz redukcję kosztów obliczeniowych dla szerokiego zakresu operacyjnego.

W Rozdz.4 (Numerical flow simulations) przedstawiono przypadek testowy oraz metody CFD zastosowane w analizach. Porównując redukcję kosztów obliczeniowych i rozbieżności wyników dla modelu CFD (3D) o zmniejszonej wierności, wykazano brak efektywności w budowanie modelu Mu-Fi w oparciu



wyłącznie o symulacje RANS o wysokiej i niskiej. W drugiej części badano wrażliwość metody 2D „Streamline Curvature”, która zapewnia najlepszą redukcję kosztów obliczeniowych.

Rozdz.5 (Multi Fidelity concept) przedstawiono koncepcję Multi Fidelity. Jako propozycję strategii Mu-Fi przyjęto próbę badania przestrzeni projektowej z wykorzystaniem modelu High-Fidelity 3D CFD i obliczeń Low-Fidelity 2D SCM.

Rozdz.6 (Final conclusions) – autor dokonuje podsumowania opracowanej metodyki oraz wyników opisanych szczegółowo w poprzednich rozdziałach. Zaprezentowana perspektywa dalszych badań pokazuje duży potencjał opracowanej metodyki i możliwości jej doskonalenia.

### **Nowości naukowe stanowiące oryginalny dorobek doktoranta**

Uważam, że rozprawa doktorska wpisuje się w aktualny cykl badań prowadzonych zarówno w Polsce jak i na świecie. Zaprezentowana metodyka Multi-fidelity pozwala na zwiększenie możliwości optymalizacji sprężarki osiowej poprzez możliwość uwzględnienia szerokiego zakresu operacyjnego maszyny tj. uwzględnienie warunków pracy innych niż projektowe (w angielskiej nomenklaturze istnieje określenie Off-Design Conditions) dla wczesnego etapu projektowania przy relatywnie niskim koszcie obliczeniowym, który wynika z wykorzystania metody 2D (Streamline Curvature Method) jako dane niskiej rozdzielczości. Praca przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i stanowi znaczący wkład w rozwój nowoczesnych technik projektowania.

Za najważniejsze oryginalne osiągnięcia naukowe autora należy uznać:

1. Opracowanie metodologii Multi-Fidelity umożliwiającej optymalizację sprężarki osiowej w obrębie sprawności oraz zapasu pracy statecznej dla szerokiego zakresu operacyjnego
2. Określenie możliwości wykorzystania modelu 2D w określaniu trendów zmian w przestrzeni optymalizacyjnej dla szerokiego zakresu operacyjnego
3. Określenie wpływu poziomu odwzorowania modelu trójwymiarowego sprężarki osiowej na jakość wyników oraz kosztowność obliczeń dla szerokiego zakresu operacyjnego

## **Krytyczna ocena rozprawy**

Uwagi krytyczne odnoszą się raczej do spraw pobocznych lub zaniechań i nie wpływają zasadniczo na sumaryczną ocenę pracy. Najważniejsze uwagi krytyczne dotyczą następujących zagadnień:

1. sposób przedstawienia opracowanej metodyki jest dość ogólny, tzn. brak jest szczegółowych danych (wzory, szczegółowe schematy, itp.) pozwalających na odtworzenie zamysłu autora. Jest to zapewne wynikiem poufności prac wykonywanych w MTU ale powoduje niedosyt u czytelnika
2. budowa modeli zastępczych jest przedstawiona dość ogólnie, do aproksymacji zastosowano powszechnie stosowaną metodę co-kriging ale również brak szczegółów implementacyjnych,
3. opis zmiennych decyzyjnych w procesie optymalizacji jest bardzo niejasny – brak rysunku wyjaśniającego/pokazującego te zmienne; jedyne rysunki badanej sprężarki to schematy nie pokazujące istotnych zmiennych geometrycznych.

W pracy nie dostrzegłem poważniejszych błędów merytorycznych czy metodycznych – praca jest efektem badań poprawnych warsztatowo i zgodnych ze współczesną wiedzą.

## **Wnioski końcowe**

W zakończeniu stwierdzam, że wniesione uwagi i zastrzeżenia nie mają zasadniczo negatywnego wpływu na moją ocenę rozprawy jako całości. Wyrażam nadzieję, że pomogą doktorantowi w doskonaleniu warsztatu badawczego i dalszym kontynuowaniu tej tematyki badawczej.

W podsumowaniu swojej recenzji stwierdzam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego wpisującego się w zakres inżynierii mechanicznej. Wskazuje jednoznacznie na dobre opanowanie przez autora zagadnień optymalizacji oraz sztucznych sieci neuronowych. Tym samym spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku „Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce”, wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Rafała Muchowskiego do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.



Tomasz Goetzendorf-Grabowski