

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Kacpra Pałkusa pt. „Low Pressure Turbine Efficiency Increase by Developing New Concept of Outer Air Seal”, w postępowaniu doktorskim wszczętym w dyscyplinie inżynieria mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej

Podstawą do wykonania recenzji jest decyzja Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza podjęta na posiedzeniu w dniu 22.11.2023 roku powołująca mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Kacpra Pałkusa pt. „Low Pressure Turbine Efficiency Increase by Developing New Concept of Outer Air Seal”.

1. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Kacpra Pałkusa pt. „Low Pressure Turbine Efficiency Increase by Developing New Concept of Outer Air Seal” dotyczy propozycji nowych rozwiązań konstrukcyjnych w obszarze łopatkowego uszczelnienia wierzchołkowego, zmierzających do ograniczenia strat przecieku, a tym samym zwiększenia sprawności części niskoprężnej turbiny silnika lotniczego. Doktorant posłużył się w swoich analizach przede wszystkim narzędziami Numerycznej Mechaniki Płynów, a tematyka i zakres pracy wpisuje się w obszar dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Bazując na danych historycznych można zaobserwować ponad 50% spadek jednostkowego zużycia paliwa w dzisiejszych konstrukcjach turbinowych silników lotniczych w porównaniu do tych budowanych w połowie XX wieku. Jednocześnie zapotrzebowanie na paliwa lotnicze wzrosło kilkukrotnie w ostatnich trzech dekadach, za sprawą znaczącego rozwoju transportu lotniczego. Pokazuje to istotę doskonalenia struktury silników lotniczych pod względem ich sprawności i ekologii, ponieważ każda, nawet najdrobniejsza modernizacja przynosi znaczne oszczędności w skali globalnej. Jedną spośród wielu możliwości zwiększania sprawności turbinowych silników lotniczych jest doskonalenie i poprawa warunków pracy labiryntowych

uszczelnień łopatkowych, w tym m.in. minimalizacja strat przecieków w uszczelnieniu wierzchołkowym wieńców łopatek wirnikowych. Straty wynikające z nieszczelności stanowią istotny element strat w przepływie przez stopnie osiowe maszyn wirnikowych. Czynniki roboczy po przepłynięciu przez nieszczelność w wieńcu wirnikowym, nie biorąc udziału w konwersji pracy użytecznej, jest dodatkowo źródłem strat związanych z mieszaniem się z przepływem głównym o innych parametrach. Mieszanie czynników powoduje dodatkowo zaburzenie pola przepływu, będącego źródłem strat w kolejnych wieńcach łopatkowych. Problemy te analizowane są w recenzowanej pracy doktorskiej, co dowodzi aktualności i ważności tematyki badawczej podjętej przez Doktoranta. Doktorant zwrócił ponadto uwagę, że analiza pracy uszczelnień łopatkowych jest problemem interdyscyplinarnych. Trudno się z tym nie zgodzić, bowiem uszczelnienia podczas swojej pracy są narażone na abrazję, erozję, utlenianie, uszkodzenie obiektami obcymi, tworzenie osadów, wycieranie materiału z obudowy na skutek kontaktu z bandażem czy łopatką (ang. rubbing) oraz zmienne obciążenia cieplne, mechaniczne i wreszcie aerodynamiczne. Ze wspomnianych przyczyn, wielkość szczeliny zmienia się zarówno podczas jednego cyklu pracy, jak również na przestrzeni całego, długoterminowego procesu eksploatacji.

Rozprawa doktorska Pana mgra Kacpra Pałkusa składa się ze spisu oznaczeń i skrótów, z 8 głównych rozdziałów, jednego załącznika, bibliografii, listy rysunków i tabel, w sumie nieco ponad 140 stron. Dysertacja przygotowana została w języku angielskim. Układ rozprawy jest logiczny, treść, rysunki oraz tabele są w miarę czytelne.

Rozprawa Doktorska rozpoczyna się od spisu symboli i skrótów. W spisie symboli pominięto jednostki, dwukrotnie użyto γ , niektóre oznaczenia nie są oczywiste, m.in. wzór na sprawność izentropową, a dość istotny tu współczynnik przepływu C_D poza spisem nomenklatury nie jest zbyt eksponowany w treści rozprawy. Staranne przygotowanie spisu symboli i oznaczeń jest ważne, zwłaszcza gdy pomija się ich opis w tekście.

Rozdział pierwszy to wstęp, który został podzielony na 6 części, motywację wyboru tematu pracy, opis wpływu sprawności części NP turbiny na sprawność całego silnika, opis celów pracy, zastosowanego warsztatu badawczego oraz struktury pracy. Rozdział drugi rozprawy to przegląd dostępnych prac w zakresie labiryntowych uszczelnień wierzchołkowych stosowanych w częściach NP turbiny silników lotniczych. Rozdział ten zawiera dwa podrozdziały, a w ostatniej części tego rozdziału w podsumowaniu sformułowano dwie tezy do potwierdzenia (lub obalenia). Rozdział trzeci przedstawia zastosowaną metodę

badawczą, sposób prowadzenia badań, analizowaną geometrię, warianty modyfikacji, zastosowane narzędzia Numerycznej Mechaniki Płynów oraz model fizyczny. W rozdziale czwartym Doktorant dokonał walidacji przygotowanego modelu obliczeniowego dla wewnętrznego kodu CFD TRACE i kodu komercyjnego ANSYS CFX. Do tego celu wykorzystano dane eksperymentalne dla trzystopniowej turbiny NP z badań przeprowadzonych na Uniwersytecie w Stuttgarcie oraz dane dla 1.5 stopniowego wirującego stanowiska do badań uszczelnień labiryntowych wierzchołkowych prowadzonych na Uniwersytecie Leibniza w Hanowerze. Rozdział ten uważam za bardzo wartościowy, zawiera on informację na temat jakości przygotowanego modelu obliczeniowego odnośnie modelowania rozkładów względnych wartości ciśnień całkowitych, ciśnień statycznych na łopatkach, kątów wylotowych z części NP oraz strumieni masowych w przepływie przez wirujące uszczelnienie labiryntowe. Zawiera on szereg rezultatów symulacji numerycznych, które wymagały dużego wysiłku w przygotowanie i wykonanie obliczeń oraz opracowanie wyników. W rozdziale piątym zatytułowanym „Nowe spojrzenie na zjawiska związane z uszczelnieniem wierzchołkowym turbiny niskoprężnej” Doktorant zaprezentował charakterystyki przepływów przez uszczelnienia labiryntowe wraz z analizą bezwymiarową. W rozdziałach szóstym i siódmym przedstawiono propozycje oraz analizy numeryczne proponowanych modernizacji struktury geometrii labiryntowego uszczelnienia wierzchołkowego wieńca wirnikowego. Są to dwa podstawowe rozdziały dysertacji. W rozdziale ostatnim przedstawiono podsumowanie, wnioski i plany na przyszłość. Do pracy załączono kopie dwóch patentów rozwiązań konstrukcyjnych będących przedmiotem analiz w recenzowanej dysertacji.

Przegląd literatury zawiera 110 pozycji, wśród których znalazły się publikacje Doktoranta oraz również publikacje prac prowadzonych przez inne krajowe ośrodki naukowe w temacie uszczelnień labiryntowych.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

Tytuł recenzowanej pracy doktorskiej wskazuje, że przedmiotem analiz będzie uszczelnienie wierzchołkowe części niskoprężnej (NP) turbiny. W pracy nie ma informacji na temat samego silnika lotniczego, którego przedmiotowa turbina jest częścią, a wszystkie dane geometryczne oraz parametry przepływowe są odniesione do wielkości referencyjnych, które nie zostały w pracy jawnie podane.

Za podstawowy cel swojej rozprawy Doktorant przyjął opracowanie modyfikacji struktury uszczelnienia wierzchołkowego, które zwiększałyby sprawność całej części NP o 0.1 punktu procentowego. Zwykle modyfikacje struktury uszczelnienia wierzchołkowego wieńca wirnikowego zmierzają do ograniczenia przecieku wierzchołkowego (nadłopatkowego). Doktorant zaproponował zmianę geometrii komory wlotowej oraz dodanie za komorą wylotową kanałów upustowych w wieńcu kierowniczym kolejnego stopnia. Doktorant postawił dwie tezy do udowodnienia w swojej pracy. W skrócie, pierwsza teza to, że istnieje oryginalne rozwiązanie uszczelnienia wierzchołkowego części NP turbiny zwiększające sprawność całej części NP co najmniej o 0.1 punktu procentowego, a druga, że zaproponowane rozwiązanie zmniejszy przeciek wierzchołkowy oraz straty mieszania. Doktorant w swoich badaniach wykorzystał dwa kody numeryczne modelujące przepływ w maszynach wirnikowych, oba bazujące na metodzie RANS. Pierwszy to kod o nazwie TRACE (Turbomachinery Research Aerodynamic Computational Environment) opracowany przez DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) i MTU Aero Engines. Kod ten jest dedykowany do obliczeń przepływu w maszynach wirnikowych i wykorzystuje tzw. density-based solver. Drugim kodem jest komercyjne narzędzie CFD ANSYS CFX, które zwykle też jest wykorzystywane do modelowania przepływów w maszynach wirnikowych. Kod ten bazuje w pełni na metodzie pressure-based dla numerycznego rozwiązania cząstkowych równań różniczkowych rządzących przepływem.

W pracy Doktorant przeprowadził szereg obliczeń wariantowych, wymagających dużego wysiłku w procesie przygotowania obliczeń, znacznego czasu na przeprowadzenie symulacji CFD oraz opracowanie wyników.

Postawiony podstawowy cel pracy został zrealizowany, a założone dwie tezy potwierdzono. Co prawda sama modyfikacja komory wlotowej nie przyniosła zakładanego celu, maksymalny wzrost sprawności wyniósł tu tylko ok. 0.06 punktu procentowego. Zastosowanie kanałów upustowych za komorą wylotową, których celem jest minimalizacja strat mieszania, pozwoliła na wzrost sprawności części NP turbiny o 0.21 punktu procentowego. Natomiast, równoczesne zastosowanie modyfikacji komory wlotowej i kanałów upustowych za komorą wylotową pozwoliło na zwiększenie sprawności o 0.27 punktu procentowego w stosunku do wartości referencyjnej. Dyskusyjnym natomiast może być fakt aplikacji tego rozwiązania w rzeczywistej maszynie.

Prezentowany w pracy warsztat badawczy, opierający się głównie na wykorzystaniu wewnętrznego i komercyjnego kodu CFD pozwolił na uzyskanie wartościowych wyników, które wnoszą istotny wkład w badania nad uszczelnieniami nadłopatkowymi łopatek wirnikowych turbin silników lotniczych. Zaprezentowane modyfikacje struktury uszczelnień może nie wyczerpują zagadnienia i można mieć pewien niedosyt, ale prezentują oryginalne, niespotykane wcześniej rozwiązanie.

3. Uwagi i komentarze

Praca doktorska została przygotowana dość starannie, choć rysunki przedstawiające rozkłady parametrów pola przepływu są niejednokrotnie mało czytelne. Powinna być zastosowana jaśniejsza kolorystyka oraz dodatkowo izoliny w kolorze czarnym. Niejednokrotnie opisy na rysunkach są zbyt małe, niemożliwe do odczytania. Niewielka ilość wzorów oraz brak bardziej dogłębnej analizy termodynamicznej i aerodynamicznej rzuca się w oczy.

Spowodowane to było prawdopodobnie ostrożnością w przekazywaniu zastrzeżonych informacji przedsiębiorstwa, we współpracy z którym realizowany był doktorat.

Uwagi odnośnie treści, zakresu oraz kwestie dyskusyjne powstałe po lekturze pracy doktorskiej:

- Należą się dokładniejsze wyjaśnienie zależności 3.3 (str.49), tj. definicji sprawności izentropowej. Jak były uśredniane wartości wzięte do obliczeń i jak były określone parametry w punkcie na wylocie po ekspansji izentropowej.
- Jaka jest wrażliwość określania sprawności izentropowej części NP od domeny obliczeniowej, siatki numerycznej oraz metody uśredniania parametrów?
- Czy rozważano użycie innego modelu oddziaływania wieńców wirnikowych poza modelem *Mixing Plane*? Jak użycie innej metody mogłoby wpływać na promieniowy rozkład sprawności izentropowej i na jej wartości?
- Czy dla zakładanych warunków brzegowych na wlocie w postaci m.in. rozkładów ciśnienia całkowitego, temperatury całkowitej oraz rozkładu ciśnienia statycznego na wylocie obserwowano zmiany masowego natężenia przepływu dla różnych wariantów obliczeniowych uwzględniających przedmiotowe modyfikacje?
- Czy próbowano dokonać porównania symulacji numerycznej dla geometrii stopni części NP turbiny wykonanej kodem TRACE i kodem ANSYS CFX dla tej samej domeny i siatki numerycznej? Chodzi o porównanie rozkładu parametrów, strat, sprawności,

czy czasu obliczeń. Z czego wynikał fakt, że kod TRACE był użyty do modelowania strumienia głównego a ANSYS CFX do analiz wariantowych?

- W uszczelnieniach labiryntowych najczęściej wykorzystywanym parametrem charakteryzującym jakość uszczelnienia jest współczynnik przepływu c_D , będący stosunkiem pomiędzy aktualnym przepływem masowym do strumienia masowego wynikającego z idealnego izentropowego rozprężania w dyszy o minimalnym polu powierzchni równym polu powierzchni wynikającym z istnienia szczeliny nad ostrzem. Dlaczego w pracy nie był on chętnie wykorzystywany?
- Czy modyfikacje geometrii komory wlotowej rozpatrywanego uszczelnienia wierzchołkowego dotyczyły także modyfikacji geometrii ostrzy? Pochylenie pierwszego ostrza uszczelnienia labiryntowego wydaje się być różne na rysunkach w rozdziale 6.
- Najlepszym sposobem poprawy jakości pracy każdego uszczelnienia labiryntowego, poza minimalizacją wielkości szczeliny, jest jak największa turbulizacja przepływu. Stąd też pomysł modernizacji geometrii kanału wlotowego jest bardzo logiczny. Natomiast zastosowanie kanałów upustowych za komorą wylotową wydaje się ułatwiać przepływ w szczelinie wierzchołkowej. Czy próbowano to oszacować i czy zysk z minimalizacji strat mieszania rekompensuje ten efekt?

4. Wnioski końcowe

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgra inż. Kacpra Pałkusa pt. „Low Pressure Turbine Efficiency Increase by Developing New Concept of Outer Air Seal” spełnia warunki określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1688). Praca prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie oraz umiejętności prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Uzyskane wyniki są oryginalne, wartościowe, a użyty warsztat badawczy prawidłowy i nowoczesny. Tym samym wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej o dopuszczenie Pana mgra inż. Kacpra Pałkusa do dalszych etapów w przewodzie doktorskim.

