

Wrocław, 06.01.2025

Prof. dr hab. inż. Piotr Kolasiński
Katedra Termodynamiki
i Odnawialnych Źródeł Energii
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław

Recenzja

Rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Dawida Zaniewskiego

pt.: „Badania układu przepływowego turbiny z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym”

1. Podstawa opracowania recenzji i informacje ogólne

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku, Pana dr. hab. inż. Grzegorza Żywicy, prof. IMP PAN, z dnia 6.10.2024 informujące o powołaniu mnie na recenzenta pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Dawida Zaniewskiego.

Praca doktorska pt.: „Badania układu przepływowego turbiny z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym” wykonana została przez Pana mgr. inż. Dawida Zaniewskiego pod kierunkiem promotora Pana dr. hab. inż. Piotra Lamparta, prof. IMP PAN i promotora pomocniczego Pana dr. inż. Piotra Klonowicza.

2. Aktualność tematu rozprawy

Rosnące zapotrzebowanie na różnorodne formy energii, takie jak ciepło, energia elektryczna i mechaniczna, prowadzi do intensyfikacji badań nad metodami jej konwersji. Jednym z obszarów takich działań są prace nad nowymi konstrukcjami turbin a w szczególności małych turbin przeznaczonych do zastosowania w różnych gałęziach techniki, m.in. w układach energetycznych takich jak np. ORC. Badania nad tymi maszynami prowadzone są w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie i obejmują zarówno opracowywanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych, modelowanie matematyczne i numeryczne procesów mechanicznych i ciepłno-przepływowych, analizy eksperymentalne jak również optymalizację maszyn. Szczególnym wyzwaniem badawczym pozostaje analiza możliwości zastosowania

małych turbin jako napędu dla innych maszyn, np. generatorów. Są to tematy nowatorskie i wciąż stosunkowo słabo zbadane z naukowego punktu widzenia.

Biorąc pod uwagę powyższe, wybór tematu pracy doktorskiej można uznać za trafny i istotny zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Jego realizacja pozwala doktorantowi wykazać się zarówno w zakresie przygotowania i prowadzenia eksperymentów, jak i w modelowaniu matematycznym i numerycznym.

3. Charakterystyka treści rozprawy

Treść rozprawy przedstawiono na 154 stronach z zachowaniem podziału na spis treści, streszczenie, wykaz oznaczeń, 6 rozdziałów oraz wykaz literatury. W pracy zamieszczono 107 rysunków, 5 tabel, i 91 pozycji literatury (z czego 3 pozycje zaliczają się do dorobku naukowego Doktoranta).

Rozdział 1 pt.: *Wstęp* wprowadza czytelnika w temat rozprawy poprzez omówienie charakterystyki turbin na tle innych grup maszyn i ich zastosowań w różnych gałęziach techniki.

Autor wskazuje w rozdziale dwa główne cele realizacji pracy, którymi są:

1. Opracowanie nowoczesnej i utylitarnej z inżynierskiego punktu widzenia metody projektowania częściowo zasilanych promieniowych stopni turbinowych z zabiegiem stopniowania prędkości w jednym wieńcu wirnikowym,
2. Opis mechanizmu strat częściowego zasilania w nietypowym promieniowym układzie przepływowym turbiny, w którym kierunek przepływu przez wieńiec łopatek wirnikowych jest okresowo odwracany w poszczególnych sektorach.

Autor formułuje dwie następujące tezy rozprawy:

1. Projektowanie promieniowego stopnia turbinowego wykorzystującego częściowe zasilanie i zabieg stopniowania prędkości w jednym wieńcu łopatek wirnikowych jest możliwe z wykorzystaniem modelu 0D z superpozycją strat przy wsparciu symulacji numerycznych wykorzystujących model 2D, szczególnie do wyznaczenia niestacjonarnych składowych strat częściowego zasilania.
2. Mechanizmy powstawania strat częściowego zasilania w stopniu promieniowym wykorzystującym stopniowanie prędkości w jednym wieńcu łopatek wirnikowych częściowo odbiegają od mechanizmów w klasycznym częściowo zasilanym stopniu.

Następnie, Autor omawia kolejno układ pracy, umiejscowienie poruszanego problemu w dziedzinie naukowej i stosowane metody badawcze.

Rozdział 2 pt.: *Przegląd literatury* przedstawia wyniki przeprowadzonego przez Doktoranta obszernego rozeznania literaturowego. Autor podzielił rozeznanie literaturowe na grupy zagadnień dotyczących prowadzonych obecnie kierunków badań przepływowych turbin cieplnych, nietypowych układów przepływowych turbin (obejmujących rozwiązania częściowego zasilania stopnia turbinowego i stopniowania prędkości) oraz stanowiącego główny obszar zainteresowań badawczych Doktoranta stopniowania prędkości w jednym wieńcu wirnikowym. Analiza literatury przeprowadzona została na podstawie książek i artykułów naukowych o wysokiej jakości z których duża część została opublikowana w renomowanych czasopismach o międzynarodowym zasięgu oddziaływania ujętych na liście JCR.

Rozdział 3 pt.: *Obiekt badań – prototypowa turbina 5 kW* opisuje w sposób wyczerpujący turbinę będącą przedmiotem badań realizowanych w ramach rozprawy oraz wyniki przeprowadzonych numerycznych badań weryfikacyjnych zaprojektowanej konstrukcji. W pierwszej części rozdziału Autor omawia przyjętą przez siebie metodę projektowania i budowy prototypowej turbiny z dwoma stopniami prędkości realizowanymi w jednym wieńcu wirnikowym, sposób weryfikacji projektu z wykorzystaniem symulacji CFD, analizę wytrzymałościową tarczy wirnikowej i elementów ciśnieniowych, analizę modalną drgań zaprojektowanego wirnika turbiny, projekt konstrukcyjny prototypu, testy ruchowe prototypowej turbiny bez obciążenia – pomiar drgań wirnika. W drugiej części rozdziału przedstawiono wyniki symulacji 2D w projektowym punkcie pracy przeprowadzonych w celu scharakteryzowania przepływu w badanej maszynie.

Rozdział 4 pt.: *Badania prototypowej turbiny pod obciążeniem* przedstawia wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Doktoranta w laboratorium Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden. Autor omawia kolejno cel badań, stanowisko badawcze, metodykę badań, wyniki pomiarów bezpośrednich, uzyskane doświadczalnie charakterystyki pracy turbiny i walidację modelu obliczeniowego poprzez porównanie wyników eksperymentu z wynikami symulacji,

Rozdział 5 pt.: *Model strat częściowego zasilania układu przepływowego ze stopniowaniem prędkości w jednym wieńcu wirnikowym* przedstawia opis zastosowanego przez Doktoranta modelu opisującego wpływ strat wynikających z częściowego zasilania układu przepływowego

i stopniowania prędkości w jednym wieńcu wirnikowym. Omówiono kolejno analizę wyników modelowania numerycznego na podstawie którego zidentyfikowano i opisano mechanizm strat częściowego zasilania w badanym układzie przepływowym, adaptację modelu superpozycji strat częściowego zasilania i metodę hybrydową wyznaczania strat częściowego zasilania wykorzystującą wyniki uzyskane na drodze analizy eksperymentalnej i symulacje CFD.

Rozdział 6 pt.: *Wnioski i podsumowanie* zestawia i omawia najistotniejsze wyniki badań przeprowadzonych przez Autora w ramach pracy doktorskiej, potwierdza tezy rozprawy, określa wnioski i wskazuje na możliwe kierunki dalszej analizy zagadnienia.

Ostatnia część pracy to wykaz cytowanej literatury.

4. Ocena i uwagi dotyczące strony merytorycznej rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy istotnego z naukowego i praktycznego punktu widzenia problemu rozwoju konstrukcji małych turbin przy zastosowaniu zaawansowanych metod modelowania i badań eksperymentalnych. W pracy podjęto próbę sformułowania metody projektowania małych turbin charakteryzujących się częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym. Temat badawczy, którego realizacji podjął się Doktorant jest zagadnieniem złożonym i łączącym problemy dotyczące procesów cieplno-przepływowych i mechanicznych.

Doktorant opracował w oparciu o przyjęte założenia projektowe i zdefiniowaną równaniami analitycznymi procedurę obliczeniową kod w oprogramowaniu MatLAB, którego celem działania było wyznaczenie podstawowych parametrów projektowanej maszyny w tym m.in. geometrii dyszy i profilu łopatki wirnikowej. Następnie, Doktorant wykorzystał gradientowy algorytm typu implicit filtering i za jego pomocą przeprowadził optymalizację geometrii kanału nawrotnego turbiny co pozwoliło mu na zaproponowanie geometrii korpusu kanału nawrotnego z kanałami dla trzech sektorów zasilania.

Określone za pomocą przyjętej metody obliczeniowej wymiary geometryczne poszczególnych podzespołów maszyny zostały następnie poddane weryfikacji i analizie cieplno-przepływowej przy wykorzystaniu dwuwymiarowego modelu numerycznego, który został opracowany przez Autora w oprogramowaniu ANSYS CFX. Techniki modelowania numerycznego Autor wykorzystał również do przeprowadzenia analizy wytrzymałości zaproponowanej konstrukcji. Uzyskane wyniki pozwoliły Doktorantowi na zaproponowanie ostatecznej wersji konstrukcji turbiny, na podstawie której wykonany został jej prototyp

cechujący się mocą ok. 5 kW i prędkością obrotową ok. 30 000 obr/min. Prototyp został następnie poddany analizie eksperymentalnej celem której było doświadczalne określenie jego osiągnięć i warunków pracy. Badania zostały przeprowadzone w laboratorium Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden przy wykorzystaniu sprężonego powietrza. Badania prowadzono pod obciążeniem i przy uwzględnieniu zmiennych warunków zasilania maszyny (tj. wykorzystaniem wszystkich trzech sektorów zasilania, dwóch sektorów zasilania i jednego sektora zasilania). Na podstawie wyników badań eksperymentalnych opracowano charakterystyki pracy turbiny w postaci przebiegu zmiany mocy i sprawności w odniesieniu do prędkości obrotowej. Następnie uzyskane doświadczalnie wyniki porównano z wynikami uzyskanymi na drodze symulacji numerycznych co pozwoliło Doktorantowi na stwierdzenie, że przy znanych uproszczeniach i ograniczeniach dwuwymiarowy model symulacyjny CFD może być wykorzystany do dalszych badań analitycznych prototypu. W dalszej kolejności autor podjął się obszernego modelowania i opisu mechanizmu powstawania strat zachodzących w układzie przepływowym badanej maszyny. Określenia strat dokonał dla różnych warunków pracy turbiny przy pomocy opracowanych modeli analitycznych i numerycznych wykorzystując wyniki badań eksperymentalnych co pozwoliło mu na rozpoznanie mechanizmu ich powstawania i sformułowania wniosków z przeprowadzonej w ramach pracy doktorskiej analizy oraz potwierdzenie tezy rozprawy.

Oceniając dokonania Pana mgr. inż. Dawida Zaniewskiego należy wskazać, że rozwiązanie przedstawionych jako celów realizacji pracy doktorskiej zadań wymagało od Doktoranta samodzielności naukowej oraz posiadania i umiejętnego wykorzystania zaawansowanej wiedzy z zakresu mechaniki i budowy maszyn energetycznych, termodynamiki i wymiany ciepła, matematyki, informatyki i komputerowych technik modelowania numerycznego procesów cieplno-przepływowych. Z treści rozprawy jednoznacznie wynika, że Doktorant wykazuje się umiejętnością doboru odpowiednich metod realizacji prowadzonych przez siebie badań. Metody te obejmowały zastosowanie zaawansowanych modeli analitycznych i numerycznych, prowadzenia badań eksperymentalnych oraz interpretacji ich wyników.

Analizując treść rozprawy pod względem merytorycznym uznać należy, że postawione przez Doktoranta w rozdziale 1 cele zostały w pełni osiągnięte a tezy rozprawy zostały udowodnione. Zastosowanie zaproponowanych przez Doktoranta modeli i metod projektowania turbin z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym umożliwiło opracowanie turbiny prototypowej i następnie doświadczalne określenie jej parametrów ruchowych. Należy podkreślić, że opracowane metody cechuje interesujący potencjał aplikacyjny.

Doktorant wykazał umiejętność korzystania ze światowych zasobów literatury. W pracy odniósł się do 91 pozycji literaturowych, z których wiele to artykuły opublikowane w ostatnim czasie w recenzowanych czasopismach posiadających współczynnik oddziaływania IF. Doktorant dokonał przeglądu literatury w obszarze zagadnień związanych z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w turbinach, metodami modelowania i optymalizacji stosowanymi do symulacji i prognozowania parametrów pracy tych maszyn. Rozeznanie to pozwoliło mu na trafne określenie tez badawczych, kierunku, zakresu i programu realizacji prac będących przedmiotem rozprawy doktorskiej.

Analizując rozprawę doktorską stwierdzam, że Doktorant wykazał iż potrafi sformułować problem badawczy oraz znaleźć stosowne narzędzia do jego rozwiązania jak i przeprowadzić analizę modelową oraz optymalizację problemu.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i obszarze turbin z częściowym zasilaniem i stopniowaniem prędkości w pojedynczym wieńcu wirnikowym należy uznać:

1. Przeprowadzenie obszernego przeglądu literatury dotyczącego metod modelowania i optymalizacji stosowanych do symulacji i prognozowania parametrów pracy tych maszyn,
2. Opracowanie metody projektowania tych maszyn,
3. Opracowanie modelu numerycznego tych maszyn i przeprowadzenie serii symulacji numerycznych przy jego zastosowaniu,
4. Opracowanie projektu prototypowej turbiny,
5. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych przy wykorzystaniu prototypowej turbiny, oraz opracowanie i interpretację wyników badań,
6. Rozpoznanie mechanizmu powstawania strat częściowego zasilania w tych maszynach.

Część merytoryczna pracy ma charakter analizy modelowo-doświadczalnej i została opracowana na wysokim poziomie.

Przy lekturze rozprawy nasunęły mi się następujące spostrzeżenia i pytania o których wyjaśnienie proszę Doktoranta:

1. Badania prowadzone były przy wykorzystaniu powietrza. Jakich warunków pracy maszyny spodziewałby się Doktorant przy jej zastosowaniu do rozprężania współczesnych proekologicznych czynników niskowrzących w układach ORC?
2. Czy zaprojektowana konstrukcja prototypowa może być wykorzystywana do rozprężania czynników niskowrzących czy potrzebna byłaby jej specjalna adaptacja (np. poprzez zmianę rodzaju stosowanych łożysk)?
3. W raporcie z badań eksperymentalnych Autor wspomina o oszranianiu się powierzchni zewnętrznych turbiny. Czy analizowano i obserwowano wpływ niskiej temperatury czynnika roboczego na elementy konstrukcyjne maszyny i jej parametry operacyjne?
4. Czy próbowano prowadzić analizę doświadczalną maszyny przy wykorzystaniu generatora jako obciążenia?

5. Uwagi szczegółowe dotyczące strony redakcyjnej pracy

Praca doktorska została opracowana w sposób staranny i spełnia wymagania redakcyjne zwyczajowo przyjęte dla rozpraw doktorskich. Autor posługuje się prawidłową polszczyzną i umiejętnie stosuje terminologię techniczną. Materiał ilustracyjny w postaci rysunków został opracowany czytelnie i nie budzi zastrzeżeń. W niektórych miejscach pracy zauważyć można nieliczne potknięcia literowe, edytorskie i interpunkcyjne. Celowo nie wymieniam w recenzji zauważonych potknięć gdyż są one typowe dla tego rodzaju prac a moje uwagi mają jedynie charakter porządkowy i nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy.

6. Podsumowanie

Analiza przedstawionej do oceny pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Dawida Zaniewskiego wskazuje, że praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie złożonego problemu naukowego. Doktorant wykazał, że posiada i umiejętnie wykorzystuje wiedzę teoretyczną z zakresu mechaniki i budowy maszyn energetycznych, termodynamiki, wymiany ciepła, mechaniki płynów, matematyki i komputerowego modelowania procesów ciepłno-przepływowych. Doktorant wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych ponieważ potrafi przeanalizować i wykorzystać dostępne w literaturze dane naukowe, sformułować modele analityczne i numeryczne maszyny oraz przeprowadzić przy ich wykorzystaniu proces jej projektowania, konstruowania i modelowania oraz określić warunki i przeprowadzić analizę

eksperymentalną maszyny a następnie przedyskutować i zinterpretować uzyskane wyniki oraz na ich podstawie sformułować wnioski. Doktorant osiągnął cenne wyniki, które mogą stanowić przyczynek do kontynuacji badań.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Dawida Zaniewskiego ma charakter odpowiadający wymaganiom stawianym pracom doktorskim i spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – Dz. U. 2023 r., poz. 742 ze zm. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego PAN w Gdańsku o przyjęcie pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Dawida Zaniewskiego i dopuszczenie go do publicznej obrony. Ponadto, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny, zachowanie wysokich standardów badawczych oraz oryginalne podejście do rozwiązania złożonych zagadnień naukowych wnoszę do Rady Naukowej o wyróżnienie rozprawy.

Piotr Usherinski