

Prof. dr hab. Władysław Kryłłowicz
Instytut Maszyn Przepływowych
Politechniki Łódzkiej

Łódź, dn. 3.12.2020 r.

RECENZJA

Pracy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Witanowskiego

Pt.: „*Wielokryterialna optymalizacja sprawności układów przepływowych turbin cieplnych z wykorzystaniem algorytmów hybrydowych* „

Podstawa prawna recenzji

Niniejsza recenzja została zlecona pismem nr. RN-421-7/16 a dnia 5 listopada 2020 sygnowanym przez Dyrektora ds. naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku p. dr hab. Marcina Lackowskiego. Decyzja o powołaniu recenzenta została podjęta na posiedzeniu Rady Naukowej tegoż Instytutu w dniu 13 października 2020r.

Przewód doktorski pana mgr. inż. Łukasza Witanowskiego został wszczęty 15-go czerwca 2016r. w dziedzinie *nauk technicznych* i dyscyplinie naukowej *Budowa i Eksploatacja Maszyn* (zgodnie z obecnym ustawodawstwem – *Inżynieria Mechaniczna*)

Ocena formalna rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa jest bardzo obszerna, liczy aż 189 stron. Podzielona jest na trzynaście rozdziałów, łącznie z wnioskami końcowymi. Praca obejmuje również bibliografię (łącznie 146 pozycji) świadczącą o znakomitej orientacji Doktoranta co do stanu aktualnej wiedzy w dziedzinie objętej badaniami. Ponadto zamieszczono streszczenie plus wykaz oznaczeń i skrótów, niezbędny dla zrozumienia tak wielowątkowej pracy.

Praca jest pod względem edycyjnym znakomita, również strona językowa nie budzi zastrzeżeń. Autor poprawnie posługuje się zarówno polskojęzyczną terminologią techniczną jak i terminologią z dziedziny obliczeń CFD oraz algorytmów optymalizacyjnych.

Ocena merytoryczna rozprawy

Instalacje energetyczne oparte o obiegi ORC są obecnie jedynym uznanym i efektywnym ekonomicznie sposobem na wytwarzanie energii elektrycznej ze źródeł ciepła o niskiej entalpii (przykładowo złoża geotermalne czy też ciepło odpadowe – *waste heat*). Instytut Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, którego pracownikiem jest Doktorant, jest obecnie bezspornie krajowym liderem w badaniach i aplikacjach technologii ORC.

Praktyka wykazała, że kluczowy- najtrudniejszy obliczeniowo i technologicznie element instalacji ORC stanowi rozprężarka - a w zdecydowanej większości przypadków jest nią turbina. W praktyce stosujemy niemal wszystkie znane rodzaje turbin: promieniowe, osiowe reakcyjne, akcyjne, jedno- czy też wielostopniowe. I z tego punktu widzenia tematyka pracy Doktoranta została bardzo trafnie wybrana.

Zadaniem inżyniera jest konstruowanie maszyn, które powinny spełniać swoją rolę najlepiej jak jest to możliwe. Maszyny, w tym i turbiny, budowano w przeszłości w oparciu o intuicję inżynierską oraz doświadczenia praktyczne, ale też i w oparciu o badania eksperymentalne. Mając do dyspozycji uniwersalne narzędzie obliczeniowe, jakim są kody CFD, możemy optymalizację konstrukcji przeprowadzać na drodze symulacji. Stąd też bierze się geneza recenzowanej rozprawy doktorskiej. Pan inż. Witanowski sformułował tezę (rozdział pierwszy punkt 1.2), że w wyniku optymalizacji i zastosowania metod hybrydowych możliwe jest podniesienie sprawności przepływowej turbin ORC o kilka punktów procentowych i w efekcie końcowym otrzymanie wysokosprawnych układów przepływowych tych maszyn.

Doktorant przeprowadził gruntowną analizę stanu technologii ORC obejmującą zarówno własności niekonwencjonalnych czynników roboczych jak konstrukcje turbin (rozdziały drugi, i czwarty). Stanowi to solidną podstawę dla Jego dalszych działań.

Rozdział trzeci zawiera skrótowy opis modelu obliczeniowego przepływu przez ułotkowanie turbiny ORC opartego o metodę RANS, konsekwentnie stosowaną przez Autora. Autor z powodzeniem stosuje dwurównaniowy model turbulencji Mentera, stanowiący kombinację modeli $k-\omega$ w obrębie warstwy przyściennej oraz $k-\epsilon$ w zdrowej strudze. Ten model sprawdził się w znacznej mierze nawet w obliczeniach palisad sprężarkowych, charakteryzujących się silnymi oderwaniami i może być uznany za obecnie obowiązujący standard.

Nie będę oceniał rozdziału szóstego, w którym opisano metodykę parametryzacji układu przepływowego turbin, ponieważ większość algorytmów jest

rozwinięciem dotychczasowych stosowanych (z powodzeniem) w macierzystej jednostce Autora. Autor odniósł się w wystarczającym zakresie do źródeł literaturowych.

Fundamentem pracy jest autorska modyfikacja algorytmu hybrydowego typu HNMP SO, na który składają się : metoda Neldera- Meada oraz algorytm roju cząstek (PSO). Doktorant dokonał w rozdziale piątym przeglądu algorytmów optymalizacyjnych, w tym i algorytmów hybrydowych. Dla tak skomplikowanych algorytmów pierwszoplanowym problemem jest ich wiarygodność. Należy stwierdzić, że w przypadku obliczeń Doktoranta zachodzi współzależność pomiędzy Jego algorytmem optymalizacyjnym a dokładnością obliczeń CFD metodą RANS. Zamieszczone w rozdziale ósmym porównanie obliczeń oraz wyniku eksperymentu przeprowadzonego na stoisku osiowej turbiny ORC o mocy 1kW wykazuje zdumiewającą zgodność (rys.8.11, str.81). Dla niskich obciążeń rozbieżności są nieco większe , co jest zrozumiałe. Świadczy to, że przedstawiony model obliczeniowy poprawnie odwzorowuje pracę zespołu turbina –generator.

W rozdziale dziesiątym p. inż. Witanowski zawarł wyczerpujący opis procesu optymalizacji geometrii części przepływowej osiowej turbiny ORC o mocy nominalnej 40 kW a ponadto opis stanowiska badawczego oraz porównanie wyników symulacji i eksperymentu. Porównanie to (w postaci zależności mocy oraz sprawności w funkcji prędkości obrotowej (rysunki 9.35 i 9.36, str.105) wykazuje daleko idącą zbieżność wyników obliczeń optymalizacyjnych oraz eksperymentu. Różnice pomiędzy sprawnością obliczoną i zmierzoną nie przekraczają 14 punktów, co świadczy przede wszystkim o dokładności modelu matematycznego. Uważam, że Doktorant udowodnił w sposób bezsporny prawdziwość swojej tezy sformułowanej w punkcie 1.2.

Dalsze rozdziały (od dziesiątego do dwunastego), zawierające opis obliczeń optymalizacyjnych dwu turbin osiowych oraz stopnia promieniowego mają już moim zdaniem mniejsze znaczenie na tle całego obszernego materiału zawartego w rozprawie. Jednak po uzyskaniu wyników badań eksperymentalnych mogą stać się dodatkowym argumentem na korzyść Autora, a ponadto cennym materiałem publikacyjnym.

Zamieszczone na końcu rozprawy wnioski i uwagi końcowe (str.169) w klarowny sposób podsumowują osiągnięcia Doktoranta, a ponadto zarysowują kierunki dalszych prac w dziedzinie turbin ORC.

Po przeprowadzeniu analizy rozprawy muszę jednak sformułować szereg pytań, na które nie znalazłem odpowiedzi:

- W tytule pracy widnieje fraza „optymalizacja...układów przepływowych turbin cieplnych”. Do turbin cieplnych zaliczamy również i turbiny gazowe i turbiny energetyczne, pracujące w obszarze pary wilgotnej. Czy możemy zastosować metodykę zastosowaną przez Doktoranta również do tych maszyn ? Moim zdaniem – nie całkiem. Z związku z tym pojawia się zarzut (skierowany raczej do Promotora, a nie do p. Witanowskiego) czy tytuł pracy jest adekwatny do zawartości .
- Drugie pytanie jest ściśle związane z pierwszym. Otóż optymalizowane łopatki turbin ORC są stosunkowo niskie, co jest charakterystyczne dla tej podgrupy turbin cieplnych. Przykładowo dla turbiny opisanej przez Doktoranta w rozdz. jedenastym (str.142) wysokość łopatki wynosi jedynie ok. 60 mm. Czy można zatem bez zastrzeżeń zastosować optymalizacyjną metodę Autora dla wyższych, silnie skrzyęconych łopatek? Oczywiście pomijamy tu z założenia bardzo wysokie łopatki ostatnich stopni turbin parowych. (w punkcie 6.4 str. 60 omówiono pobieżnie skrzyęcenie łopatek, ale to mnie nie do końca przekonuje)
- W IMP PAN obroniono pracę doktorską p. dr. Romana Rusanowa z Charkowa. Jednym z jej elementów była analiza turbiny promieniowo-osiowej. Czy jest to ta sama turbina, którą Doktorant opisuje w rozdziale dwunastym? (w wykazie piśmiennictwa nie znalazłem rozprawy p. Rusanowa.)
- W rozdziałach 8 oraz 9 Doktorant zamieścił porównanie wyników obliczeń optymalizacyjnych oraz eksperymentu. Uzyskane wyniki oceniam, jak to już wcześniej opisałem, za duży sukces. Jednak, oceniając prace nad podobnym stoiskiem turbiny ORC muszę stwierdzić, że eksperyment tego rodzaju wymaga pracy całego . zespołu specjalistów, począwszy od konstruktorów aż do elektroników. W związku z tym proszę Doktoranta o deklarację, jaki był Jego osobisty udział w tych badaniach.
- Moja ostatnia uwaga dotyczy definicji wielkości k_u (*velocity ratio* , str. 66, tab.7.1) .W dostępnej literaturze, począwszy od Stodoli aż do Perycza wielkość k_u jest zdefiniowana inaczej. Moim zdaniem pod pierwiastkiem brakuje cyfry „2”, a ponadto nie uwzględniono energii kinetycznej dolotowej. Czy jest to błąd, czy też taka definicja jest znana w literaturze – jeżeli tak to skąd ją zaczerpnięto?

Bardzo proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do tych uwag. Oczywiście nie umniejszają one wartości pracy, a są naturalne wobec złożoności podjętej przez Doktoranta tematyki.

Wnioski końcowe:

Po przeprowadzeniu oceny merytorycznej oraz oceny edycyjnej i formalnej rozprawy doktorskiej p. mgra. inż. Łukasza Witanowskiego , pod tytułem „Wielokryterialna optymalizacja sprawnościowa układów przepływowych turbin cieplnych z wykorzystaniem algorytmów hybrydowych”, z dziedziny nauk technicznych i dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna stwierdzam, że **recenzowana praca spełnia bez żadnych zastrzeżeń wymogi określone w odpowiedniej Ustawie o stopniach i tytule naukowym.**

W związku z tym stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony Jego dysertacji.

Wniosek o wyróżnienie pracy

Biorąc pod uwagę wartość naukową oraz aspekty aplikacyjne rozprawy, wnioskuję o wyróżnienie pracy, w ramach procedur obowiązujących w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN.

Wniosek uzasadniam faktem, że stworzony przez Doktoranta algorytm optymalizacyjny układów przepływowych turbin ORC stanowi nowość na skalę krajową. Pan mgr. inż. Łukasz Witanowski udowodnił w sposób wystarczający użyteczność tego narzędzia projektowego. Dalszy rozwój algorytmu pozwoli na bezproblemową budowę turbin ORC a zatem i własnych instalacji ORC, tak potrzebnych na polskim rynku.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'W. Witkowski', with a long horizontal line extending to the right.