

dr hab. inż. Marian Piwowski, prof. PG
Politechnika Gdańska
Wydział Mechaniczny
Katedra Energetyki i Aparatury Przemysłowej

RECENZJA
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Łukasza Witanowskiego

pt.:

**„Wielokryterialna optymalizacja sprawności układów przepływowych turbin
ciepłych z wykorzystaniem algorytmów hybrydowych”**

Podstawę recenzji stanowi Uchwała Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szwalskiego PAN w Gdańsku z dnia 13 października 2020 roku.

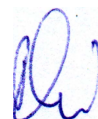
W recenzowanej dysertacji Autor przedstawił własne koncepcje wykorzystania metod optymalizacyjnych, w tym również hybrydowych, do wspomagania projektowania geometrii układu przepływowego mikroturbin. Pozwoliły one na poprawę, o kilka punktów procentowych, sprawności układów przepływowych, co zostało potwierdzone z zadowalającą dokładnością dla kilku turbin ORC (ang. Organic Rankine Cycle). Tematyka ocenianej pracy, postawione w niej cele i osiągnięte rezultaty posiadają duże znaczenie aplikacyjne, są aktualne i istotne.

Przedstawiona do recenzji praca składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim, spisu oznaczeń, 13 rozdziałów, wykazu literatury oraz 7 załączników zawierających autorskie kody obliczeniowe. Zasadnicza część pracy liczy 165 stron.

Zakres rozprawy

W krótkim wstępie Autor uzasadnił tematykę pracy związaną z procesem projektowania turbin w siłowniach ORC, omówił układ pracy oraz przedstawił dwa zasadnicze jej cele pracy:

1. Opracowanie metody optymalizacji numerycznej układów przepływowych turbin ORC wspomagającej proces projektowania turbin z wykorzystaniem oryginalnych algorytmów hybrydowych oraz metod parametryzacji kształtu układu przepływowego;
2. Wykonanie praktycznej optymalizacji konkretnych rozwiązań turbin ORC



i uzyskanie wysokosprawnych układów przepływowych możliwych do wykonania z punktu widzenia technologicznego, które zostaną zainstalowane we wdrożeniowych/demonstracyjnych układach ORC.

Na podstawie przeprowadzonego rozpoznania literaturowego oraz doświadczenia zawodowego mgr inż. Łukasz Witanowski postawił następującą tezę rozprawy:

- W wyniku przeprowadzonej optymalizacji i zastosowania metod hybrydowych, możliwe jest podniesienie sprawności przepływowej turbin ORC o kilka punktów procentowych i otrzymanie wysokosprawnych układów przepływowych. Przewiduje się, że proces optymalizacji pozwoli na uzyskanie wymiernych korzyści, które mogą wynikać z niewielkich zmian geometrii, a końcowy efekt procesu ulepszania związany jest ściśle z odpowiednim przygotowaniem parametryzacji obiektu, wyborem algorytmu optymalizacyjnego oraz poprawnym zdefiniowaniem funkcji celu i nałożonych ograniczeń (kar).

Rozdział 2 zawiera omówienie zagadnień związanych z procesem projektowania układów przepływowych turbin ciepłych ze szczególnym uwzględnieniem tych pracujących w siłowniach ORC. Omówiono najistotniejsze parametry projektowe wpływające na sprawność układu przepływowego, a tym samym i całej turbiny. Siłownie ORC dotyczą stosunkowo niewielkich mocy, począwszy od mierzonych w pojedynczych kilowatach do kilku megawatów mocy, to proces projektowania odbiega od metod klasycznych, tj. dla turbin pracujących na parę wodną. Przeprowadzony, przez Autora, w tym rozdziale przegląd literatury wskazał cały szereg aspektów wymagających szczególnego uwzględnienia podczas projektowania turbin ORC. Mianowicie dotyczy to, między innymi: rodzaju czynnika ekspandującego w turbinie, dużej prędkości obrotowej (nierzadko ponad 100 tys obr/min), niewielkich objętości właściwych czynnika, które w połączeniu z niewielkimi strumieniami masowymi prowadzą do bardzo krótkich łopatek (nawet kilka milimetrów) wymagających często częściowego zasilania, niewielkie średnice podziałowe i krótkie łopatki przy określonych luzach prowadzą do dużych strat przepływu, mniejszych wskaźników prędkości, dużych prędkości czynnika (nierzadko liczba Macha znacznie przekracza 1, a nawet 2) i wiele innych. Racjonalny dobór parametrów pozwalających zaprojektować turbinę o zadowalającej sprawności wymusza na projektantach zastosowania rozmaitych metod optymalizacyjnych, w których za funkcję celu uznaje się najczęściej maksymalizację sprawności lub minimalizację strat. W tym rozdziale omówione zostały również spotykane w literaturze metody optymalizacyjne.

W rozdziale 3 Autor, bardzo krótko i zwięźle, przedstawił najczęściej stosowane w obliczeniach numerycznych modele przepływu.

Kolejny rozdział zawiera porównanie właściwości najczęściej stosowanych czynników w siłowniach ORC. Właściwości termodynamiczne czynników roboczych w układach ORC, zależnie od rodzaju czynnika, odbiegają od siebie bardzo znacznie,

różnią się między sobą np.: gęstościami, parametrami krytycznymi, kształtem krzywej granicznej, przewodnością cieplną czy ściśliwością, które utrudniają proces modelowania numerycznego przepływu. Stosowane, rozmaite uproszczenia dla gazów doskonałych, w analizowanych przez Autora przypadkach, nie znajdują zastosowania i wymagają stosowania uzupełnienia, także różnego dla różnych czynników.

Rozdział 5 zawiera opis, spotykanych do wspomagania procesów projektowych, algorytmów optymalizacyjnych. Krótko omówione zostały, przez Autora, algorytmy deterministyczne, stochastyczne oraz hybrydowe.

W następnym rozdziale zostały pokazane sposoby parametryzacji profili zarówno kierowniczych jak i wirnikowych w turbinach osiowych i promieniowych.

W rozdziale 7 Autor przedstawił metodykę budowania własnego algorytmu optymalizacyjnego geometrię kanału przepływowego stopnia turbinowego. Zdefiniowana została funkcja celu, ograniczenia, charakterystyczne wskaźniki stopnia, organizacja obliczeń przepływowych i wytrzymałościowych tj. sposób budowy siatek obliczeniowych, rodzaje siatek, ilość elementów, normalizacji danych itd.

Kolejny rozdział to wykorzystanie zaproponowanego w poprzednim rozdziale podejścia projektowo-obliczeniowego do zaprojektowania kanału przepływowego turbiny o mocy około 1kW pracującej na czynnik HFE 7100. Otrzymane wyniki obliczeń zostały zweryfikowane poprzez wykorzystanie danych pomiarowych na stanowisku badawczym w IMP PAN. Uzyskane wyniki obliczeniowe z modelu zero-wymiarowym oraz z CFD wykazały się bardzo dobrą zgodnością z obliczeniami, czym Autor wykazał poprawność swoich algorytmów i możliwość ich wykorzystania w dalszych analizach.

Zaproponowane algorytmy optymalizacyjne pozwoliły zaprojektować turbinę o zmodyfikowanym kształcie kanału przepływowego (moc około 40 kW na czynnik toluen). Tymi analizami Autor zajmował się w rozdziale 9. W procesie obliczeniowym Kandydat wykorzystał i porównał ze sobą trzy algorytmy optymalizacyjne (Nelder-Meada, filtrowania niejawnego oraz metody hybrydowej powstałej z połączenia algorytmu genetycznego z metodą Nelder-Meada), które pozwoliły stworzyć turbinę o poprawionej sprawności o 2,7 punkt procentowy dla metody filtrowania niejawnego. Wykonaną turbinę przebadano na stanowisku badawczym IMP PAN jednak zamiast toluenu zastosowano odpowiednio podgrzane sprężone powietrze. Uzyskane wyniki pomiarowe potwierdziły dobrą zgodność wyników pomiarów z obliczeniami CFD.

W rozdziale 10 znalazły się wyniki optymalizacji wielostopniowej stopnia turbiny osiowej o mocy 10kW. W rezultacie optymalizacji hybrydowej, w tym wypadku były to szeregowo połączone algorytmy, dzięki którym udało się uzyskać geometrię stopnia turbinowego pozwalającą znacznie podwyższyć sprawność turbiny (około 6,5 punktu procentowego).

Rozdział 11 poświęcony jest wielokryterialnej optymalizacji sprawnościowej

stopnia turbiny osiowej o mocy 300kW w siłowni ORC. W tym wypadku analizowana siłownia przewidziana jest do pracy w trybie wytwarzania tylko energii elektrycznej oraz kogeneracyjnym (w połączeniu z wytwarzaniem energii cieplnej). W tym przypadku Autorowi na skutek przeprowadzenia optymalizacji wielokryterialnej udało się podwyższyć sprawność o 3,1 punktu procentowego dla pracy kogeneracyjnej i 4,8 punktu procentowego dla pracy z wytwarzaniem tylko energii elektrycznej. Autor w tym miejscu mocno podkreślił, że przedstawiona metoda uwzględniająca wyznaczenie optimum na podstawie frontu Pareto nie była stosowana dla turbin ORC.

Rozdział 12 zawiera analizy optymalizacyjne kanałów przepływowych turbiny z promieniowym napływem i osiowym wypływem czynnika HFE7100 o mocy 10kW. Dla tej geometrii Autor zastosował 8 metod optymalizacyjnych: deterministyczne, stochastyczne oraz hybrydowe, dla których, w Jego ocenie, najkorzystniejszy pozwolił podwyższyć sprawność o 2,1 punktu procentowego.

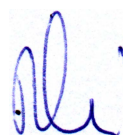
W końcowym 13 rozdziale Autor dokonał podsumowania, w którym zawarł ocenę otrzymanych w poszczególnych fragmentach pracy wyników oraz sformułował wnioski końcowe.

Bibliografia rozprawy liczy 146 pozycji dotyczących opisywanych zagadnień. Większość pozycji stanowią publikacje naukowe o zasięgu międzynarodowym z ostatnich dwudziestu pięciu lat.

Całości dopełniają załączniki zawierające autorskie kody obliczeniowe.

Charakterystyka rozprawy

W ostatnim czasie (około 30 lat) można zaobserwować szereg działań ukierunkowanych na poprawę zarówno efektywności wytwarzania energii elektrycznej jak i wspieranie energetyki rozproszonej opartej na lokalnych i odnawialnych źródłach energii. W mikrosiłowniach ORC wykonuje się rozmaite czynności mające na celu podniesienie jej sprawności ale także sprawności poszczególnych jej głównych elementów tj. turbin, wymienników ciepła, generatorów itd. Trudności przy budowie mikrosiłowni turbinowych to przede wszystkim miniaturyzacja elementów, bardzo wysokie prędkości obrotowe, przeniesienie napędu, zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa, zmniejszenie hałasu, wybór najkorzystniejszego czynnika roboczego, zmniejszenie emisji szkodliwych związków do atmosfery czy konstrukcja generatora elektrycznego. Bardzo duże utrudnienia wynikają również z wykonaniem odpowiedniej optymalizacji termodynamiczno-przepływowej i projektowaniem części przepływowej o wysokiej sprawności, należytym łożyskowaniem i dynamiką szybkoobrotowych układów wirujących oraz miniaturyzacją wymienników ciepła i intensyfikacją procesów cieplnych. Dotychczas stosowane w procesie projektowania turbin o dużej mocy metody projektowe wymagają modyfikacji, które są sukcesywnie w ostatnich latach wdrażane. Niemniej jednak każde działanie, które prowadzi do poprawy efektywności tychże procesów



projektowych jest ważne i potrzebne. Oceniana dysertacja dotyczy problematyki związanej z optymalizacją kanałów przepływowych mikroturbin jako głównych elementów mikrośilowni ORC. W świetle wcześniejszych wywodów wybór problematyki badawczej jest jak najbardziej właściwy i interesujący z naukowego punktu widzenia. Autor rozprawy proponuje opracowanie numerycznej metody optymalizacji układów przepływowych turbin ORC wspomagającej proces projektowania turbin z wykorzystaniem oryginalnych algorytmów hybrydowych i metod parametryzacji kształtu układu przepływowego oraz wykonanie praktycznej optymalizacji konkretnych rozwiązań mikroturbin jako jej główne cele. Obliczenia numeryczne, szczególnie trójwymiarowe, powszechnie stosowane w procesie projektowania mikroturbin wymagają odpowiednio szybkich komputerów i czasochłonnych obliczeń. Zatem optymalizacja układów przepływowych turbin powinna wykorzystywać takie metody optymalizacyjne, które pozwolą na osiągnięcie zakładanego efektu (np. maksymalizacja sprawności czy minimalizacja strat) przy ograniczaniu czasu jego wykonywania. W dysertacji mgr inż. Łukasza Witanowskiego, do celów optymalizacyjnych, proponowanych jest kilka metod deterministycznych, stochastycznych, genetycznych oraz hybrydowych. Poprawność metod optymalizacyjnych była walidowana na stanowisku badawczym z mikroturbiną osiową o mocy 1kW pracującą na pary czynnika HFE 7100 czym Autor wykazał poprawność jej działania. Wyniki optymalizacji zostały wykorzystane do procesu projektowania kanałów przepływowych mikroturbin osiowych o mocach odpowiednio 10kW 40kW i 300kW oraz promieniowo-osiowej (10kW). Przeprowadzone analizy pozwoliły wykazać, że dzięki zastosowaniu odpowiednich metod optymalizacyjnych możliwe jest podniesienie sprawności układu przepływowego od 2,1 punktu procentowego do 4,8 punktu procentowego w zależności od mocy, konstrukcji turbiny czy czynnika roboczego, czym Autor udowodnił postawioną w dysertacji tezę. Przeprowadzone przez Autora obszerne analizy wykazały również, co wydaje się zgodne z dotychczasową wiedzą, że nie ma jednej, uniwersalnej metody optymalizacyjnej dającej najkorzystniejsze wartości sprawności układu przepływowego. W jednej konstrukcji najefektywniejsze są metody deterministyczne, w innym przypadku filtrowania niejawnego, a jeszcze w innym metody hybrydowe. Autor wykonał również szereg badań eksperymentalnych potwierdzających i weryfikujących otrzymane rezultaty co znacząco podnosi jakość ocenianej pracy.

Opisany wcześniej zakres pracy jest spójny i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Zawiera niezbędne procedury jakie należy wykonać przy podobnych opracowaniach. Widoczne jest kompleksowe podejście do zagadnienia i metodyczne rozwiązywanie poszczególnych zagadnień cząstkowych. Wartość merytoryczną pracy oceniam bardzo wysoko.

Stwierdzam, że zrealizowany przez Doktoranta w rozprawie doktorskiej zakres pracy, jego wkład w rozwój wiedzy dotyczącej procesu projektowania kanałów przepływowych

turbin mają istotne znaczenie.

Uwagi krytyczne i pytania do dyskusji

Ocenia dysertacja jest napisana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym niemniej jednak podczas sprawdzania pojawił się szereg uwag krytycznych i dyskusyjnych wymagających wyjaśnienia, które spisałem w kolejności ich się pojawiania w pracy:

1. Dokładniejszego wyjaśnienia wymagałoby pewne, w mojej ocenie dość niezręczne, stwierdzenia:
 - „...otrzymanie wysokosprawnych układów przepływowych...” – str.11;
 - „...wysoki stopień ekspansji...”- str. 15,
 - „...rozsądnej wartości wyróżnika szybkobieżności...”- str. 15,
 - „...niskie prędkości dźwięku...”- str. 15,
 - „...projektowanie wyższych łopatek...”- str. 16,
2. Proszę o wyjaśnienie „...*W przypadku turbin małej mocy zastosowanie stopniowania spadku entalpii (ekspansji) nie jest uzasadnione nie tylko ze względu na wysokie koszty, ale i paradoksalnie nieraz niższą sprawność...*”- str. 16;
3. Proszę o wyjaśnienie „...*pierwszy z nich zależy liniowo od prędkości obrotowej, a drugi od średnicy wymiaru głównego...*”- str. 18;
4. W podpisie rys. 2.4 jest „*Kształt łopatki...*” czy aby na pewno?;
5. Proszę o interpretację sformułowania *rozrzut* – tab. 4.1;
6. Brak jest w rozdziale 5 szerszej analizy dlaczego Autor zdecydował się na takie, a nie inne algorytmy optymalizacyjne, chociażby metoda hipersześcienna, kierunków sprzężonych Powella czy metody gradientowe;
7. Proszę o interpretację definicji wskaźników przedstawionych w tab. 7.1 (str. 65), tu przydałby się opis słowny, taki znajduje się dopiero w tab. 10.10 (str. 111);
8. W podrozdziale 7.4 zdecydowano się na użycie stopu aluminium 7075 jako materiału do obliczeń wytrzymałościowych. Również w dalszej części dysertacji nie jest kontynuowany temat tych obliczeń – proszę o wyjaśnienia.;
9. Niezbyt fortunnym wydaje się podpisanie rys. 8.10 jako charakterystyka mocy skoro na wykresie jest pokazane różnokolorowe pole - proszę o wyjaśnienia;
10. Na rys. 8.11 pokazane są trzy linie dotyczące obliczeń CFD, pomiarów oraz tzw. obliczeń „zero-wymiarowych”. Jak na tej osi interpretować czas? Czy to znaczy, że po około 45 minutach mamy bardzo dobrą zgodność wyników obliczeń z pomiarami pod względem osiągniętej mocy? Jak to się ma do obliczeń „0d”? Proszę o wyjaśnienia.;
11. Proszę o wyjaśnienie sposobu określania wartości kątów (α_2 i β_2) w trójkątach prędkości na rys. 9.3 oraz rys.10.3;
12. Brak też szerszej dyskusji otrzymanych wyników z tabel od 9.1 do 9.7 oraz tabel od 10.1 do 10.7, uzyskane liczby Macha (np. $M_{cl}=2,282$), zmiana (~ 20 razy) objętości właściwej podczas ekspansji w kierownicy, bardzo duża zmiana długości łopatki wirnikowej do kierowniczej (75%), wielkości luzów osiowych i promieniowych

w stopniu turbinowym itd.;

13. Proszę o wyjaśnienie dlaczego na rys. 9.6 ekspansja w wirniku rozpoczyna się od punktu 1T, a nie jak to jest ogólnie przyjęte od punktu 1 co pokazano na rys.7.2?
 14. Proszę o wyjaśnienie takiego niefortunnego zdania „...*mikroturbina o sprawności 80,7% wydaje się posiadać dość wysoką wartość konwersji energii, zwłaszcza, że jest to maszyna akcyjna o przepływie osiowym*...” – str. 87;
 15. Proszę o wyjaśnienie dlaczego na rys. 9.27 ciśnienie w zbiorniku 2 (11bar) jest wyższe niż za sprężarką (10bar)?
 16. Proszę o wyjaśnienie co oznacza ciągła, niebieska linia na rys.9.30.
- Przedstawione powyżej uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny i nie obniżają mojej pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

Ocena redakcyjna rozprawy

Dysertacja zredagowana jest poprawnie, w sposób zrozumiały, z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Praca charakteryzuje się właściwą strukturą, chociaż z nieco zachwianą równomiernością. Dla uproszczenia struktury dysertacji korzystne byłoby połączenie np. rozdziału 2 i 3 oraz rozdziału 5 i 6. Sugerowałbym również rezygnację z trzeciego poziomu nagłówków tj. usunięcie ze spisu treści podrozdziałów np. 5.1.1, 5.1.2 itd., gdyż wątpliwym jest są tytuły podrozdziałów np. 6.2.1 *Wersja 1* czy dalej 6.2.2 *Wersja 2*. Zastrzeżenia budzi także mieszanie terminologii angielskiej i polskiej (np. rysunki 1.2, 1.3, 1.4, 2.1, 2.2, 2.3, 2.13, 2.15, 4.8, 4.9, 9.3, 9.17, 10.3, 12.2 czy tabele 7.2, 7.3). Poniżej zostaną przytoczone pozostałe błędy językowe oraz redakcyjne (nielicznych uchybień interpunkcyjnych i ortograficznych nie przytaczam):

- brak uporządkowania wykazu oznaczeń i skrótów znacznie utrudnia czytanie pracy, wykaz nie zawiera również szeregu oznaczeń (co najmniej 20) znajdujących się w pracy np.: ΔH , V_a (rys.2.2), N_s (rys.2.3), IFR, IFG (rys. 2.6 ÷ rys.2.12), n_s (rys.2.12) oraz wiele innych;
- powinno się używać sformułowania: *entalpia właściwa*, *entropia właściwa* zamiast *entalpia* czy *entropia* – wykaz oznaczeń;
- powinno się używać sformułowania: *u wierzchołka*, *lub u stopy* zamiast „...*na obrzeżu zewnętrznym wieńca łopatkowego*...” – wykaz oznaczeń;
- powinno się używać sformułowania: „*sprawność równą 88%.*” zamiast „*sprawność na poziomie 88%.*” - np. str. 14;
- powinna być nazwa czynnika opisana jako *cycloheksan* - rys. 2.9;
- korzystniejsze byłoby sformułowanie: *wirnik dwuprzepływowy* zamiast „*dwustronny wirnik*”, - str. 27;
- brak linii w okolicy punktu krytycznego na wykresach z rys.4.1 oraz 4.2;
- brak opisu rysunku – powinno być po lewej profil palisady kierowniczy, a po prawej profil palisady wirnikowej – rys.4.10
- brak przywołania w tekście rys. 7.1 – str. 64;

- powinno się używać sformułowania: (*uzyskano moc projektową równą około 2kW*) zamiast „(*projektowo uzyskano moc na poziomie ok. 2kW*).” - str. 75;
- powinno być „*Za pomocą tej metody...*” zamiast „*Za pomocą tej metody...*” – str. 85;
- w tab. 10.4 wielkość łuku zasilania (ϵ) powinna wynosić 100% zamiast 1%;
- brak przywołania w tekście rys. 10.44, wydaje się, że powinno to znajdować się w niedokończonym zdaniu na górze str. 126;
- sformułowanie „*Filtrowanie Niejawne*” powinno być pisane z małych liter;
- błędnie zostały opisane pozycje bibliograficzne nr: [4], [40], [86], [91], [131].

Mimo dość dużej ilości nieścisłości piśmienniczych moja całościowa ocena redakcyjna jest jak najbardziej pozytywna, niemniej jednak tego typu zastrzeżenia należałoby uwzględnić w przyszłych publikacjach.

Wnioski końcowe

Praca dotyczyła optymalizacji układów przepływowych mikroturbin o różnych mocach elektrycznych z zastosowaniem kilku metod optymalizacyjnych zakończonych weryfikacją eksperymentalną. W tym celu Kandydat opracował oryginalne koncepcje posługując się krytyczną analizą istniejącego stanu wiedzy oraz zaawansowanymi metodami symulacji komputerowych z użyciem programów EES, Matlab i Ansys.

Treść zawarta w ocenianej dysertacji odpowiada tytułowi pracy, a układ tematyczny pracy jest logiczny. Nie ustrzeżono się jednak pewnych błędów językowych i redakcyjnych, z których ważniejsze przytoczyłem powyżej.

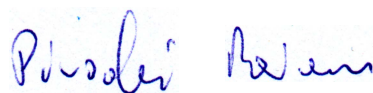
W podsumowaniu niniejszej opinii o recenzowanej rozprawie doktorskiej stwierdzam, że postawiony problem badawczy został rozwiązany, a teza została w sposób wystarczający udowodniona. Podstawowe cele naukowe rozprawy zostały osiągnięte. Autor rozwiązał zagadnienie wykorzystania metod optymalizacyjnych układów przepływowych mikroturbin do wspomagania procesu projektowania i w konsekwencji podwyższania siłowni ORC przeprowadzając zaawansowane obliczenia numeryczne i wykonując weryfikujące badania doświadczalne. Wymagało to wysokich umiejętności merytorycznych oraz dużego nakładu pracy. Uzyskane wyniki mają wartość poznawczą i utylitarną oraz posiada bardzo istotne znaczenie praktyczne. Wymienione powyżej uwagi krytyczne nie umniejszają w sposób istotny wartości merytorycznej rozprawy i w dużej mierze mają charakter dyskusyjny.

Praca jest poprawna pod względem merytorycznym, a w przedstawionych analizach Doktorant wykazał duży zasób wiedzy nie tylko z zakresu inżynierii mechanicznej, a kierunki rozważań świadczą o umiejętności oryginalnego i samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych. Autor wykazał się dobrą znajomością metod numerycznych w obszarze modelowania matematycznego, wytrzymałościowego oraz modelowania przepływów. Przedstawiona praca wykazuje dobre przygotowanie pana mgr inż. Łukasza Witanowskiego do samodzielnej pracy naukowej. Czego dowodem są także liczne publikacje Autora w renomowanych czasopismach naukowych.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana praca jest oryginalna, wartościowa i przedstawia nowe osiągnięcia badawcze o znacznych walorach poznawczych, a zatem spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim.

Podsumowując podane wyżej oceny uważam, że opiniowana rozprawa spełnia wymagania obowiązującej Ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych stawiane rozprawom na stopień doktora z dziedziny nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i dlatego **stawiam wniosek o dopuszczenie mgra inż. Łukasza Witanowskiego do publicznej obrony.**

Gdańsk, dnia 04 stycznia 2021 r.



dr hab. inż. Marian Piwowski, prof. PG