

Gdańsk, dn. 30.08.2022

dr hab. inż. Jerzy Głuch prof. uczelni
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Instytut Oceanotechniki i Okrętownictwa
ul. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
jgluch@pg.edu.pl

Recenzja Rozprawy Doktorskiej
mgr Michaliny Kurkus-Gruszeckiej zatytułowanej:
„INVESTIGATION OF THERMAL AND FLOW PROCESSES IN
LOW-PRESSURE ROTARY LOBE EXPANDERS”

Podstawa opracowania recenzji:

o sygnaturze

Promotor pracy:

Promotor pomocniczy rozprawy:

pismo prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego,
Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny
Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka
Politechniki Warszawskiej
RDN-IŚGiE/76/2022 z dnia 19 lipca 2022 r.
prof. dr hab. inż. Krzysztof Badyda
dr hab. inż. Piotr Krawczyk

1. Problem i cele rozprawy

Autorka recenzowanej pracy doktorskiej, pani mgr Michalina Kurkus-Gruszecka, zajmuje się problemem badań nad zjawiskami cieplnymi i przepływowymi obrotowych ekspanderów krzywkowych. Zagadnienie to jest szczególnie ważne dla zastosowania urządzeń wytwarzających i przetwarzających energię w warunkach relatywnie niskich poziomów energetycznych ich czynników roboczych. Taką sytuację napotyka się na przykład wykorzystując odnawialne źródła energii (OZE). Obrotowe ekspandery krzywkowe należą do silników cieplnych mogących pracować przy zasilaniu niskociśnieniowymi i niskotemperaturowymi czynnikami roboczymi. Badania nad zjawiskami fizycznymi są podstawą do projektowania efektywnych silników. Ich konstrukcja zależy od parametrów zastosowanych czynników roboczych i podlega optymalizacji. Optymalizacja taka jest zagadnieniem wielokryterialnym. Obok kryteriów sprawnościowych wielką rolę odgrywają kryteria ekonomiczne i środowiskowe. Zagadnienie to staje się szczególnie ważne przy eksploatacji wspomnianych silników w warunkach zmiennych obciążeń ich składowych elementów konstrukcyjnych. To motywuje do podjęcia intensywnej pracy nad badaniami wymienionych tu wstępnie problemów projektowania.

W swojej pracy Doktorantka skoncentrowała się na dwóch obszarach projektowania silników cieplnych małej mocy. Jeden z tych obszarów dotyczy zbudowania modelu obliczeniowego wybranego silnika, w tym przypadku obrotowego ekspandera krzywkowego. Drugi obszar zainteresowań Doktorantki jest związany z optymalizacją geometrii kanałów przepływowych takiego silnika, włączając w to również konstrukcje wielostopniowe. W tym drugim obszarze Doktorantka wykorzystwała zbudowany przez siebie model obliczeniowy.

W polskim i nie tylko w polskim przemyśle wspomniane problemy stwarzają wciąż pewne trudności. Badania Doktorantki pozwalają więc rozszerzyć wiedzę w nauce, a także uzupełnić

wiedzę niezbędną dla projektantów silników cieplnych małych mocy. Prawdopodobnie skonstruowane ich elementy przepływowe zmniejszają koszty inwestycyjne i eksploatacyjne. Poprawne określenie i przewidywanie charakterystyk ich układów przepływowych pozwala uzyskać najwyższe możliwe wskaźniki sprawnościowe, wytrzymałościowe i żywotnościowe. Metody optymalizacyjne powinny być wsparte wiedzą ekspercką, przy wykorzystaniu możliwości współczesnych systemów numerycznych, cyfrowych.

Doktorantka dostrzegła lukę poznawczą dotyczącą takiej wiedzy i naukowej i praktycznej. Zauważyła, że trudności w optymalizacji konstrukcji stwarza przede wszystkim wystarczająco precyzyjny model obliczeniowy niezbędny do wykonania zadań optymalizacyjnych. Jest on wymagany przy każdej metodzie optymalizacyjnej. Powoduje to, iż w wielu przypadkach możliwości zastosowania pełnej optymalizacji są ograniczone.

Dlatego też Doktorantka skierowała swoje zainteresowania na problemy modelowania i przystosowania poprawnych modeli do metod optymalizacyjnych układów roboczych w warunkach zadania. Upatruje w nich szansę na osiągnięcie co najmniej dobrej jakości i możliwości oceny charakterystyk geometrycznych konstrukcyjnych.

Rozbudowa zasobu informacji dostępnych w literaturze przedmiotu pozwalających na rozwiązywanie wspomnianych powyżej problemów skłoniła Doktorantkę do przeprowadzenia badań nad tymi zagadnieniami.

Doktorantka sformułowała następujący cel swojej pracy:

Zbadanie procesów termodynamiczno-przepływowych w niskociśnieniowych ekspanderach krzywkowych oraz sformułowanie ich modelu obliczeniowego, którego zastosowanie doprowadzi do wytycznych projektowych dla zastosowań przemysłowych.

2. Aktualność i ważność rozprawy

Recenzowana praca doktorska dotyczy ważnego technicznego zagadnienia poprawnego projektowania układów przepływowych silników cieplnych małych mocy, w tym przypadku obrotowych ekspanderów krzywkowych zasilanych parą wodną. Jest to zagadnienie szczególnie istotne przy wykorzystaniu do ich zasilania czynników roboczych o niskich parametrach ciśnienia i temperatury. Takie parametry można uzyskać przy wykorzystaniu Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) i w energetyce rozproszonej. Dodatkowo takie silniki zasilane bezpiecznymi czynnikami roboczymi mogą być używane w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, porażeniem, skażeniem chemicznym itp. Każde rozszerzenie wiedzy prowadzące do uzyskania poprawnego rozwiązania jest aktualne i jest najczęściej poważnym wyzwaniem naukowym, a następnej kolejności praktycznym. W ten nurt aktywności naukowej wpisuje się prezentowana w rozprawie praca badawcza Doktorantki. Stosowane i licznie reprezentowane w literaturze przedmiotu procedury mogą być w dalszym ciągu uzupełniane.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy więc aktualnej tematyki, a fakt ten, również w świetle obszernego zestawu pozycji przeglądu literatury przedmiotu, świadczy o dobrym rozeznaniu Doktorantki we współczesnych procesach badawczych, oraz o trafnym doborze własnej tematyki badawczej.

3. Zawartość rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 186 stron, jest napisana w języku angielskim, a składa się z części zasadniczej i dwóch załączników. Zasadnicza część posiada: streszczenia polskie i angielskie, spis rozdziałów, siedmiu numerowanych rozdziałów, podsumowania w rozdziale siódmym, wykazu używanych skrótów i pojęć, wykazu literatury liczącego 122 pozycje. Pierwszy załącznik zawiera sekwencje graficznych rozkładów prędkości, ciśnień i temperatur w kanałach elementów roboczych. Drugi z nich prezentuje program obliczeń

parametrów silnika cieplnego. Konstrukcję rozprawy zbudowano w oparciu o zasadę zaprezentowania własnych badań i metod oraz wynikających z nich wniosków.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Introduction” składającym się z pięciu podrozdziałów opisano tło badań nad silnikami cieplnymi małej mocy, ich zastosowanie, ich udział w mikrokogeneracji, zdefiniowano ekspandery krzywkowe. Wśród silników, które będą pomocne w analizie wymieniono: silniki Stirlinga, komórki paliwowe, małe silniki tłokowe, mikroturbiny, silniki Wankla, ekspandery śrubowe, ekspandery łopatkowe lub skrzydełkowe, ekspandery satelitarne, ekspandery krzywkowe. W końcowej części Doktorantka zdefiniowała cel pracy jako badanie procesów termodynamiczno-przepływowych w niskociśnieniowych ekspanderach krzywkowych prowadzące do wspomagania projektowania i optymalizacji ich układów przepływowych. Zapowiedziała zawartość dalszych rozdziałów pracy krótko opisując zreferowane w nich problemy.

W drugim rozdziale zatytułowanym „Lobe expander CFD model” składającym się z sześciu podrozdziałów zdefiniowano ekspander krzywkowy i jego zasadnicze cechy konstrukcyjne jako obiektu badań i przedstawiono etapy jego analizy. Kolejno Doktorantka dokonała przeglądu literatury przedmiotu przywołując charakterystyki przydatnych zastosowań modeli obliczeniowych CFD. Przyjęła założenia do wykorzystania równań zachowania i modelu turbulencji oraz równania dla czynnika ściśliwego. Dalej opisała dyskretyzację pól przepływu w domenach obliczeniowych. Scharakteryzowała domeny obliczeniowe, ich siatki obliczeniowe i proces obliczeniowy w ramach programu ANSYS CFX. W rezultatach wykonanych obliczeń zaobserwowała: nierówny przepływ, istotne przecieki w luzach konstrukcyjnych oraz wpływ turbulencji na nierównomierność ruch organów roboczych. Odwołała się do Załącznika 1, w którym przedstawiła graficznie sekwencje rozkładu pól ciśnień, temperatur i prędkości w kolejnych krokach obliczeniowych obrazujących przepływ przy obrocie organów roboczych ekspandera.

W trzecim rozdziale zatytułowanym „Validation of the lobe expander CFD model” składającym się z pięciu podrozdziałów Doktorantka zajęła się oceną opisanego w poprzednim rozdziale modelu obliczeniowego CFD dla ekspandera krzywkowego. Wykorzystała dostępne dane dotyczące takich silników. Są to w większości wyniki pomiarów globalnych charakterystyk takich jak moc, moment i strumień masowy czynnika roboczego w różnych warunkach obciążenia. Do wyznaczenia tych charakterystyk przygotowała własny program numeryczny, którego listing zamieściła w Załączniku 2. Doktorantka przygotowała domeny obliczeniowe dla przykładu z literatury. Dokonała obliczeń wg. opracowanego modelu. Przedstawiła metodę wyliczania sił, momentów oraz mocy. Porównała wyniki globalnych parametrów swoich obliczeń z odpowiadającymi im wynikami pomiarów. Te porównania świadczą o dobrej dokładności przygotowanego modelu obliczeniowego.

W czwartym rozdziale zatytułowanym „Expander geometry analysis based on the mathematical model” składającym się z dwóch podrozdziałów Doktorantka przyjęła do badań konfiguracje geometryczne i konstrukcyjne ekspandera krzywkowego i scharakteryzowała ich osiągi. Jako czynnik roboczy przyjęła parę wodną o parametrach wytwarzanych w kotłach małej energetyki rozproszonej. Te konfiguracje obejmują najbardziej prawdopodobny praktyczny zakres. Wyniki obliczeń są zobrazowane licznymi wykresami. Wnioski z nich wynikające tworzą podwaliny pod dalsze badania prezentowane w kolejnych rozdziałach. Należy podkreślić, że część z wniosków dotyczy zaobserwowanych charakterystyk przepływów nieszczelności.

W piątym rozdziale zatytułowanym „Leakage investigation and determination of leakage characteristics” składającym się z dwóch podrozdziałów Doktorantka przedstawiła wykorzystując opracowany model badanie przepływów nieszczelności, których wagę opisała już w poprzednich rozdziałach. Nieszczelności podzieliła na promieniowe i osiowe. Wykorzystała do ocen dane literaturowe. Tylko niewielka część tamtych badań dotyczyła ekspanderów krzywkowych, dlatego wykorzystwała też obszerniejsze wyniki badań silników Wankla, którego pewne elementy konstrukcyjne pracują podobnie do badanych ekspanderów. Wykorzystując wnioski literaturowe i własne badania Doktorantka wybrała charakterystyczne kanały

przepływowe w rejonach luzów konstrukcyjnych i zagęszczając w nich siatkę obliczeniową badała przepływy nieszczelności. Obliczenia wykonała metodą sekwencyjną dla różnych kątów obrotu wirnika uwzględniając w ten sposób niestacjonarny charakter przepływu w luzach. Do każdego kroku sekwencji dobrała odpowiednią dla niego siatkę obliczeniową. Wyniki obliczeń zaprezentowała tabelarycznie i graficznie. Za danymi literaturowymi przyjęła zależności do określania strumieni masowych nieszczelności i zastosowała je do wyników swoich obliczeń. W zakończeniu rozdziału Doktorantka zaprezentowała wyniki uproszczonych obliczeń przepływu nieszczelności w luzach osiowych. Skomentowała również proporcje pomiędzy nieszczelnościami promieniowymi i osiowymi.

W szóstym rozdziale zatytułowanym „Setting a series of design guidelines for expanders” składającym się z trzech podrozdziałów Doktorantka zastosowała opracowane metody obliczeniowe do wielostopniowych konstrukcji ekspanderów krzywkowych, których zalety wymieniła. Do obliczeń zastosowała komercyjny program ASPEN wykorzystujący wyniki cząstkowych obliczeń pojedynczych stopni i równania uzupełniające. Pozwoliło to na przedstawienie zależności równych charakterystyk globalnych wielostopniowego ekspandera od różnych parametrów geometrycznych i konstrukcyjnych, w tym od rozmiarów luzów i przepływów nieszczelności. To doprowadziło do wniosków istotnych dla konstruktorów takich silników. Wnioski te Doktorantka uzupełniła o ograniczenia wynikające z możliwości ekonomicznych, technologicznych i wytwórczych w dziedzinie budowy urządzeń technicznych.

W siódmym ostatnim rozdziale zatytułowanym „Conclusion” pani Michalina Kurkus-Gruszecka podsumowała wyniki pracy badawczej zaprezentowane w rozprawie doktorskiej. Wskazała na zrealizowanie postawionego sobie celu. Pokazała metodę naukowego rozwiązania problemu badawczego w pięciu etapach poprzez zbudowanie własnego modelu obliczeniowego ekspandera krzywkowego. Przedstawiła też ostateczne zalecenia dla konstruktorów ułatwiające procesy optymalizacyjne. Ten element pracy wskazuje na praktyczne zastosowanie zbudowanej metody. Doktorantka przedstawiła też swoje zamierzenia dotyczące rozwoju prac badawczych.

4. Rozwiązanie postawionego problemu i użyte do tego metody

Autorka użyła właściwych metod do realizacji postawionego zadania badania procesów termodynamiczno-przepływowych w niskociśnieniowych ekspanderach krzywkowych. W tym celu zbudowała ich model obliczeniowy. Model ten okazał się użyteczny w zastosowaniu do sformułowania wytycznych projektowych dla zastosowań przemysłowych. Dla rozwiązania badawczego i inżynierskiego zastosowała algorytmy obliczeń równań stanu dla rzeczywistych czynników roboczych, w tym również niskociśnieniowej pary wodnej.

Wykorzystała poprawnie algorytmy obliczeń przepływowych 2D i 3D zebrane po wykonaniu obszernych obliczeń symulacyjnych układów konstrukcyjnych ekspanderów krzywkowych. Uwzględniła złożone zjawiska fizyczne w przepływie, w tym te towarzyszące przepływowi nieszczelności w luzach konstrukcyjnych. Poprawnie je przeanalizowała, a następnie zastosowała do tworzenia i weryfikacji przepływu przez kanały przepływowe wspomnianych ekspanderów. Wykorzystała programy komercyjne ANSYS CFX, ANSYS Fluent, MATLAB i Aspen HYSYS. Utworzyła też własne programy numeryczne do obliczeń uzupełniających. Pokazała możliwości użycia zbudowanej metody jako elementu procedury optymalizacyjnej. Bardzo dobrze wykorzystała postprocesing graficzny do pokazania wyników pracy i wspomaganie wyciągania wniosków z badań.

Autorka wykazała się więc umiejętnością budowania i zastosowania termodynamiczno-przepływowych metod obliczeniowych do badania charakterystyk układów przepływowych tak złożonych i specyficznych jak te w ekspanderach krzywkowych. Właściwie odniosła się do modelowania skomplikowanych kanałów przepływowych silników cieplnych, uwzględniając też uwarunkowania technologiczne. Poprawnie zastosowane badania symulacyjne (a do takich należy zaliczyć prezentowane tu badania Autorki) są uznaną metodą w pracach naukowych i uważane za ważne źródło informacji o różnych procesach.

5. Oryginalny dorobek Autorki i przydatność uzyskanych wyników

Autorka rozwiązała oryginalne zadanie badawcze przepływu w skomplikowanych kanałach przepływowych obrotowych maszyn cieplnych. Szczególnie warta podkreślenia jest analiza przepływów nieszczelności w luzach konstrukcyjnych promieniowych i osiowych ekspanderów krzywkowych, które zmieniają się w zależności od aktualnej pozycji wirników w trakcie ruchu obrotowego. Dotyczy to zarówno płaskiej jak i przestrzennej konfiguracji. Przedstawiona przez Autorkę metoda przy zastosowaniu w procedurach optymalizacji konstrukcji stanowi o dodatkowych walorach jej badań. W pewnym sensie metoda jest wstępem do uzyskania rozwiązania ogólnego przynajmniej dla pewnego typoszeregu ekspanderów. Praca badawcza powiększyła wiedzę w obszarze silników cieplnych małych mocy. Potwierdziła ona również możliwość zastosowania metody w praktyce inżynierskiej projektowej.

6. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autorki i znajomości współczesnej literatury?

Autorka wykazała się posiadaniem dostatecznej wiedzy jako badacz – naukowiec. Świadczy o tym przede wszystkim przegląd stanu wiedzy w dziedzinie przepływów w układach silników cieplnych małych mocy i w zagadnieniach projektowych. Krytycznie przeanalizowała te informacje we wstępie recenzowanej rozprawy. Na tym tle Autorka potrafiła wskazać na miejsce występowania luki w badaniach i uzasadniła potrzebę zajęcia się postawionym problemem.

Autorka przywołała też liczne prace badawcze związane z reprezentowaną przez nią dziedziną, cytując je poprawnie w wielu miejscach rozprawy. Wykaz literatury obejmuje 122 pozycje. Cytowane są zarówno książki, monografie, jak i publikacje w czasopismach naukowych oraz referaty konferencyjne. Świadczy ten fakt o dobrej znajomości przez Doktorantkę współczesnej literatury.

7. Słabe i mocne strony rozprawy

Jako recenzent nie dopatryłem się w rozprawie zasadniczych uchybień merytorycznych.

Do mocnych stron rozprawy zaliczam następujące jej elementy:

- opracowanie metody i modelu obliczeniowego przepływu przez kanały ekspandera krzywkowego małej mocy,
- wykonanie obszernych obliczeń symulacyjnych dla kilku różnych silników krzywkowych. Obok poszerzenia bazy wiedzy naukowej daje to perspektywę zastosowania jej metody w pracy inżynierów projektantów,
- właściwą hierarchizację zadań wykonanych w trakcie realizacji badań i redagowania pracy doktorskiej,
- zaproponowanie nowoczesnej i wystarczająco precyzyjnej dla praktyki inżynierskiej metody rozwiązania problemu wyznaczenia przepływu. O dobrej precyzji świadczą w kilku przypadkach niewielkie wartości odchyłek pomiędzy dostępnymi wynikami eksperymentalnymi i integralnymi wynikami obliczeń Autorki,
- wskazanie zastosowania swojej metody w procedurach optymalizacyjnych konstrukcji ekspanderów krzywkowych,
- wykorzystanie w badaniach obszernych zbiorów wyników z obliczeń przepływowych symulacyjnych, które wymagały poprawnego uszeregowania,
- uwzględnienie w badaniach nie tylko problemów fizycznych przepływu, ale również innych ograniczeń konstrukcyjnych i technologicznych,
- osiągnięte rezultaty są bliskie zastosowań przemysłowych.

Natomiast do słabszych stron pracy, wymagających ustosunkowania się do nich przez Doktorantkę zaliczyłem:

- brak szerszego komentarza do zastosowania 2-równaniowego modelu turbulencji $k-\omega$ SST w różnych przypadkach przepływowych – duża przestrzeń przepływu i szczelina. Model ten zawiera zaś wielkości dobierane eksperymentalnie. Powstaje pytanie jak wpływają wartości tych wielkości na wyniki obliczeń.
- dla charakterystyk pracy silnika cieplnego istotne jest zjawisko tarcia. Jak zostało to uwzględnione przy wyznaczaniu charakterystyk ekspanderów,
- przydałoby się szersze wyjaśnienie dlaczego do badań w rozdziałach 4, 5 i 6 wybrano układ przepływowy ekspandera krzywkowego o 4 krzywkach na małym rotorze,
- Doktorantka określiła wielkości geometryczne silnika krzywkowego jedno- i wielostopniowego podlegające optymalizacji; jaka jest funkcja celu optymalizacji – domyślam się, że uzyskanie maksimum sprawności, cechy ekonomiczne, technologiczne, ekologiczne; ale czy są inne cele; proszę o wyjaśnienie,
- czy wyniki badań różnych charakterystyk przepływowych mogłyby być przedstawione w sposób bardziej uogólniony, na przykład w funkcji odniesionych wartości geometrycznych lub przepływowych – mogłyby one być łatwiej wykorzystane dla różnych konfiguracji konstrukcyjnych,

Redakcja pracy jest bardzo staranna. Do nielicznych zauważonych niedoskonałości redakcyjnych należą:

- Str. 14 przywołać należy istniejące w technice pytanie: “Power system is dispersed or it is distributed?”
- Str. 17 zamiast słowa „circuit” lepiej byłoby użyć „cycle”
- Str. 30 powinno być zaznaczone odniesienie przy wymiarach urządzeń do systemu SI
- Str. 31 skrót do „Finite Volume Method” powinien być „FVM”
- Str. 32 opis słowny równania zachowania masy powinien być w wierszu powyżej
- Str. 56 w tabeli 3.1 niektóre liczby nie mieszczą się w ramce
- Str. 114 w równaniach (5.2) (6.8) (6.9) występuje współczynnik liczbowy; skąd on wynika
- Str. 122 chociaż czytelnik może się domyślić, przydałoby się opis symboli do rys. 6.1 i 6.2

Przedstawione w tym fragmencie niedoskonałości nie umniejszają wartości pracy i badań naukowych zaprezentowanych w rozprawie. Rozprawa ma dużą wartość naukową a jej wnioski są ważne dla zastosowań praktycznych.

8. Podsumowanie i ocena końcowa

Praca Doktorska pani Michaliny Kurkus-Gruszeckiej zatytułowana: „INVESTIGATION OF THERMAL AND FLOW PROCESSES IN LOW-PRESSURE ROTARY LOBE EXPANDERS” jest ciekawą pracą naukową. Autorka posłużyła się poprawnie rozbudowanymi narzędziami analitycznymi i numerycznymi dla rozwiązania ważnego zagadnienia naukowego. Uzyskała rozwiązanie poprawne i ważne zarówno dla badań naukowych jak też dla zastosowań przemysłowych, stwarzając perspektywę praktycznego wykorzystania osiągniętych rezultatów.

Biorąc pod uwagę wszystkie aspekty przedstawionej w recenzji charakterystyki pracy stwierdzam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania, jakie Ustawa z dnia 20 lipca 2018 Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (art. 187) w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka stawia rozprawom doktorskim.

Wobec powyższego wnioskuję o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej i o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

Jednocześnie zgłaszam do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej wniosek o wyróżnienie doktorantki pani Michaliny Kurkus-Gruszeckiej za recenzowaną przeze mnie pracę kwalifikacyjną. Wniosek uzasadniam następująco:

- przedstawiona praca kwalifikacyjna wskazuje na duże teoretyczne i praktyczne doświadczenie Doktorantki w obszarze metod numerycznej mechaniki płynów oraz znajomości i uwzględnienia w swoich badaniach ograniczeń konstrukcyjnych i technologicznych; dlatego też mogła stworzyć metodę która łatwo może nabyć znamion ogólności,
- jako obiekt badań Doktorantka wybrała słabiej rozeznany obszar silników cieplnych małych mocy mogących znaleźć zastosowanie w energetyce rozproszonej,
- Doktorantka opracowała naukową metodę, która jest już bliska zastosowaniom przemysłowym.

