

Gdańsk, dn. 03.01.2023

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](mailto:jgluch@pg.edu.pl)

**Recenzja Rozprawy Doktorskiej**  
**mgr inż. Radosława Bondyry zatytułowanej:**  
**„PRZEPŁYWOWO-DYNAMICZNA MODERNIZACJA**  
**ŁOPATKI WIRNIKOWEJ TURBINY PAROWEJ”**

Podstawa opracowania recenzji:

pismo dr hab. inż. Grzegorza Żywicy,  
Zastępcy Dyrektora ds. Naukowych  
Instytutu Maszyn Przepływowych PAN  
w Gdańsku

o sygnaturze

Promotor pracy:

Promotor pomocniczy rozprawy:

RN-421-5/22 z dnia 23 listopada 2022 r.

prof. dr hab. inż. Romuald Rządkowski

dr inż. Krzysztof Dominiczak

**1. Problem i cele rozprawy**

Autor recenzowanej pracy doktorskiej, pan mgr Radosław Bondyra, zajmuje się problemem modernizacji maszyn przepływowych, które wymagają usprawnień po okresie eksploatacji. Zagadnienie to jest szczególnie ważne dla zastosowania urządzeń wytwarzających i przetwarzających energię, zwłaszcza turbin parowych, w warunkach wprowadzania ostrych norm ochrony środowiska i zastosowania odnawialnych źródeł energii w systemach energetycznych. Nowoczesne technologie zeroemisyjne nie są jeszcze w stanie w pełni zaspokoić nieustannie rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną. Dlatego też w dalszym ciągu siłownie konwencjonalne będą użytkowane w najbliższym okresie. Prowadzi to do minimalizacji kosztów w gospodarce energetycznej. Jednocześnie modernizacje pozwalają na maksymalizację wydajności i efektywności obiektów energetycznych. W dalszym etapie poprawia to sprawności turbin parowych i wydłuża ich żywotność. Oznacza to mniejsze zużycie paliw kopalnych, co zmniejsza emisję szkodliwych substancji, w tym gazów cieplarnianych.

Naukowym wyzwaniem są badania nad zjawiskami fizycznymi w układach przepływowych będącymi podstawą do projektowania efektywnych silników cieplnych. Ich konstrukcja zależy od parametrów zastosowanych czynników roboczych i podlega optymalizacji. Optymalizacja taka jest zagadnieniem wielokryterialnym. 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 dla celów modernizacyjnych.

W polskim i nie tylko w polskim przemyśle wspomniane problemy stwarzają wciąż pewne trudności. Badania Doktoranta pozwalają więc rozszerzyć wiedzę w nauce, a także uzupełnić wiedzę niezbędną dla projektantów silników cieplnych. Prawdłowo skonstruowane lub modernizowane ich elementy przepływowe zmniejszają koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.

Poprawne określanie i przewidywanie charakterystyk ich układów przepływowych pozwala uzyskać najwyższe możliwe wskaźniki sprawnościowe, wytrzymałościowe i żywotnościowe. Metody optymalizacyjne wykorzystywane w tym zakresie powinny być wsparte wiedzą ekspercką, przy wykorzystaniu możliwości współczesnych systemów numerycznych, cyfrowych.

W swojej pracy Doktorant skoncentrował się na dwóch obszarach projektowania i modernizacji stopni turbin parowych średniej i dużej mocy. Jeden z tych obszarów dotyczy modernizacji układu przepływowego wybranej turbiny, w tym przypadku ostatniego stopnia kadłuba średnioprężnej turbiny klasy 200 MW spełniającego wymagania dostarczania maksymalnie dużej mocy i o najwyższej możliwej sprawności w warunkach modernizacji. Drugi obszar zainteresowań Doktoranta jest związany z optymalizacją parametrów konstrukcyjnych układu łopatkowego zadanego stopnia takiego silnika, uwzględniając ograniczenia wytrzymałościowe, produkcyjne i normalizacyjne wytwórcy. Doktorant wykorzystał zbudowaną przez siebie metodę projektowania do celów modernizacji.

Doktorant dostrzegł lukę poznawczą dotyczącą takiej wiedzy i naukowej i praktycznej. Zauważył, że trudności przy modernizacji konstrukcji stwarza przede wszystkim wystarczająco precyzyjny model obliczeniowy. Jest on wymagany przy każdej metodzie modernizacji konstrukcji, kiedy istotne jest spełnienie wymagań nie tylko przepływowych i wytrzymałościowych, ale również dopasowanie modernizacji do istniejących i niezmiennych elementów konstrukcyjnych. Dodatkowo istotne jest dopasowanie się do procedur normalizacyjnych wytwórcy umożliwiających standaryzację projektowanych i modernizowanych elementów, a przez to łatwą adaptację w programach produkcyjnych.

Dlatego też Doktorant skierował swoje zainteresowania na problemy modelowania i przystosowania poprawnych modeli do zbudowania metody planowania modernizacji układów roboczych turbin w warunkach zadania. Upatruje w nich szansę na osiągnięcie co najmniej dobrej jakości i możliwości oceny charakterystyk stopni turbinowych i ich elementów konstrukcyjnych.

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

Doktorant sformułował następujący cel swojej pracy:

analiza możliwości zaimplementowania łopatek dłuższych niż 400mm oraz zaprojektowanie wysokosprawnej łopatki wirnikowej ostatniego stopnia części średnioprężnej układu łopatkowego bez drutu tłumiącego. Uzasadnieniem rozpoczęcia prac nad zwiększeniem sprawności łopatki części średnioprężnej był brak takiej łopatki w programie produkcyjnym firmy wykonującej modernizacje turbin na polskim rynku energetycznym.

## **2. Aktualność i ważność rozprawy**

Recenzowana praca doktorska dotyczy ważnego technicznego zagadnienia poprawnego projektowania dla celów modernizacji układów przepływowych silników cieplnych średnich i dużych mocy, w tym przypadku ostatniego stopnia części średnioprężnej turbiny klasy 200 MW. Jest to zagadnienie szczególnie istotne przy planowaniu modernizacji istniejących i wciąż użytkowanych turbin parowych w dużym systemie energetycznym. Spełnienie wymagań najwyższej możliwej sprawności w warunkach modernizacji wybranych elementów konstrukcyjnych turbiny ma tutaj fundamentalną rolę. Wpływa bowiem w zasadniczy sposób na spełnianie norm ochrony środowiska w przemyśle energetycznym. Uzasadniona ekonomicznie i ekologicznie modernizacja eksploatowanych obiektów energetycznych jest ważną i często spotykaną operacją techniczno-organizacyjną. Zadanie projektowania w warunkach

modernizacji różni się zasadniczo od projektowania nowej maszyny. Bowiem projektując modernizowane elementy z uwzględnieniem zachodzącego postępu technicznego napotyka się znacznie więcej ograniczeń niż dla projektu nowego urządzenia. Każde rozszerzenie wiedzy prowadzące do uzyskania poprawnego rozwiązania jest aktualne i jest najczęściej poważnym wyzwaniem naukowym, a w następnej kolejności praktycznym. W ten nurt aktywności naukowej wpisuje się prezentowana w rozprawie praca badawcza Doktoranta. 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 Doktoranta we współczesnych procesach badawczych, oraz o trafnym doborze własnej tematyki badawczej.

### **3. Zawartość rozprawy**

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 154 strony, jest napisana w języku polskim, a składa się z części zasadniczej i pięciu załączników. Zasadnicza część posiada: wykaz używanych skrótów i pojęć, spis rozdziałów, streszczenia polskie i angielskie, dziewięć numerowanych rozdziałów, w tym podsumowanie w rozdziale dziewiątym, bibliografię liczącą 87 pozycji, spis rysunków, spis tabel. Pierwszy załącznik zawiera wstępne szkice łopatki kierowniczej. Drugi załącznik zawiera wstępne szkice łopatki wirnikowej. Trzeci załącznik zawiera rysunki pól przepływu ilustrujących zjawisko oderwania strugi. Czwarty załącznik zawiera zmodernizowane szkice łopatki wirnikowej. Piąty załącznik prezentuje tabelę z parametrami termodynamicznymi. Konstrukcję rozprawy zbudowano w oparciu o zasadę zaprezentowania własnych badań i metod oraz wynikających z nich wniosków.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp” opisano tło badań nad turbinowymi silnikami cieplnymi średniej i dużej mocy, ich drogi rozwoju i zastosowanie, ich udział w systemach energetycznych, zdefiniowano zadania projektowe i modernizacyjne. Scharakteryzowano wymagania sprawnościowe i ekologiczne. Wśród problemów modernizacyjnych wskazano na te związane z ostatnim stopniem części średnioprężnej. Doktorant zdefiniował ograniczenia projektowe wymuszające przygotowanie specjalnej metody projektowania do celów modernizacyjnych układów przepływowych gwarantujących długotrwałą bezawaryjną pracę. Zapowiedział budowę takiej metody.

W drugim rozdziale zatytułowanym „Opis modernizacji turbiny 13K215” przedstawiono historię rozwoju turbin parowych klasy 200 MW, ich zasadnicze cechy konstrukcyjne jako obiektu badań i etapy jego analizy. Pokazano parametry pracy. Kolejno Doktorant zwrócił uwagę na liczebność tej klasy w polskim systemie energetycznym – ponad 60 jednostek. Dokonał przeglądu literatury przedmiotu Scharakteryzował kolejne modernizacje prowadzące dostosowania bloków do współczesnych wymagań. Okazało się bowiem, że żywotność znakomitej większości elementów konstrukcyjnych pozwala na ich eksploatację w dłuższych interwałach czasowych. Przedstawił graficznie zasadnicze cechy konstrukcji tych turbin. Najistotniejszym fragmentem do modernizacji z punktu widzenia rozprawy jest część średnioprężna. W turbinie 13K215 wykonanej w technice akcyjnej łopatka ostatniego stopnia wirnikowego miała długość 500 mm oraz posiadała dwa druty tłumiące. Druty te były niezbędne do zapewnienia wymaganych charakterystyk dynamicznych palisady wirnikowej, ale generowały dodatkowe straty. Po pierwszych modernizacjach dokonano przejścia na technologię reakcyjną. Wysokość łopatki wylotowej zmniejszono do maksymalnej wartości 400 mm. W tym rozwiązaniu nie zastosowano jednak drutów tłumiących, natomiast posiada ono bandaże. Dlatego też pojawiła się możliwość zwiększenia wysokości łopatki, a przez to poprawienia sprawności po spełnieniu warunków rozważanych w dalszych rozdziałach.

W trzecim rozdziale zatytułowanym „Projektowanie łopatek ostatniego stopnia i opis problematyki” składającym się z trzech podrozdziałów Doktorant zajął się oceną opisaną w

poprzednim rozdziale konstrukcji i jej modernizacji. Wykorzystał dostępne dane dotyczące takich silników.

Wymienił warunki, które muszą być uwzględnione przy modernizacji: wysoką temperaturę czynnika roboczego powiązaną z przejściowymi gradientami temperatury, wysokie ciśnienie robocze, siły odśrodkowe, cykliczność pracy (częste rozruchy i odstawienia turbozespołów), obciążenia statyczne i dynamiczne parowe, chwilową pracę przy częstotliwościach rezonansowych, zanieczyszczenie pary, nieprawidłowe parametry pary.

Przeciwdziałając przy modernizacji wyżej wymienionym czynnikom, wpływającym na żywotność łopatki, skupił się na: dopasowaniu profilu do przewidywanego obciążenia mechanicznego i parowego, doborze odpowiedniego bandaża i stopki, dostosowanych nie tylko pod względem wytrzymałościowym, ale także z uwzględnieniem przyszłej lokalizacji instalacji w turbinie, doborze materiału, dokładności wykonania i wykończenie powierzchni itd.

Scharakteryzował łopatkę turbiny składającą się z trzech głównych części: pióra, bandaża oraz stopki. Wymienił siły działające na łopatkę podczas pracy turbiny: rozciąganie od siły odśrodkowej, zginanie od siły odśrodkowej, zginanie od przepływającej pary, obciążenia dynamiczne.

Opisał problemy konstrukcyjne związane z wymienionymi powyżej procedurami modernizacji. Zilustrował graficznie układ łopatkowy ostatniego stopnia. Specjalną uwagę poświęcił zjawiskom dynamicznym, m.in. obciążeniom nisko- i wysokocyklowym. Przywołał zagadnienia materiałowe i technologiczne. Zacytował liczne kwestie modernizacyjne raportowane w literaturze przedmiotu. W końcowej części rozdziału przytoczył wymagania normalizacyjne i standardowe konieczne do uwzględnienia przy modernizacji elementów konstrukcyjnych. Pokazał brak dłuższych łopatek niż 444 mm w programie produkcyjnym, chociaż uwidoczniło, że zwiększenie długości powiększało moc i sprawność stopnia.

W czwartym rozdziale zatytułowanym „Cel i zakres pracy” Doktorant przyjął do badań konfiguracje geometryczne i konstrukcyjne modernizowanego stopnia i scharakteryzował ich osiągi. Te konfiguracje obejmują najbardziej prawdopodobny praktyczny w rozwoju zakres. Wyniki obliczeń są zobrazowane wykresami a geometrię zilustrowano fragmentem przekroju osiowego turbiny. Wnioski z nich wynikające tworzą podwaliny pod dalsze badania prezentowane w kolejnych rozdziałach. To doprowadziło do sformułowania celu pracy: analizy możliwości zaimplementowania łopatek dłuższych niż 400 mm oraz zaprojektowanie wysokosprawnej łopatki wirnikowej ostatniego stopnia części średnioprężnej układu łopatkowego bez drutu tłumiącego. W końcowej części przedstawiono w skrócony sposób zakres pracy.

W piątym rozdziale zatytułowanym „Podstawy teoretyczne projektowania łopatek turbin parowych” składającym się z dwóch podrozdziałów Doktorant przedstawił metodykę projektowania i obliczeń układów łopatkowych. Rozpoczął od przedstawienia metody obliczeń 2D dla łopatek długich. Zajął się zwłaszcza metodami projektowania układu łopatkowego. W dalszej części przedstawił metodykę obliczeń sprawności stopnia turbinowego. Opisał kilka mechanizmów powstawania strat przepływowych w stopniach turbinowych: straty profilowe, straty wtórne zlokalizowane przy ścianach bandaża i podstawy łopatki, straty nadbandażowe, straty wylotowe, straty krawędzi spływu, straty nakładania się kanałów przepływowych, straty luzu osiowego między łopatkami. Każdą z tych strat dokładniej scharakteryzował w dalszej części rozdziału.

W szóstym rozdziale zatytułowanym „Łopatka ostatniego stopnia – metoda projektowania i określenie maksymalnej długości” składającym się z trzech podrozdziałów Doktorant zaproponował zastosowanie opisanych wcześniej metod obliczeniowych do ostatniego stopnia, ale z uwzględnieniem pracy stopnia przedostatniego. Rozwagał zarówno aspekty przepływowe, wytrzymałościowe, ale także parametry geometryczne kadłuba i pozostałych elementów stacjonarnych do zainstalowania wyższych łopatek. Opisał też propozycje, rozwiązań wspomagających tłumienie drgań łopatek, które jest jednym z kluczowych problemów dla łopatek w lokalizacji układu przepływowego w części SP.

Opisał metodologię projektowania z uwzględnieniem ograniczeń tworzonych przez zastosowanie jej do modernizacji. Przedstawił schemat graficzny metody. Pokazał ją też w zastosowaniu do programu ANSYS Workbench 2019, z użyciem programów CATIA i BladeGen wykorzystywanych przez producenta GE. Na tle pierwotnej konstrukcji kadłuba i kolejnych jego modernizacji Doktorant sprawdził możliwości adaptacji łopatek dłuższych do tych elementów konstrukcyjnych które nie podlegają zmianom. W razie konieczności wskazał ewentualną konieczność dalszych zmian w konstrukcji. Dotyczy to zwłaszcza wylotu do dyfuzora.

W końcowej części rozdziału Autor zajął się problemem tłumienia drgań, których charakterystyka po modernizacji uległa zasadniczym zmianom. Analizował rozwiązania: pierścienie tłumiące, tłumik – tzw. „snubber”, odpowiednio zaprojektowany bandaż, podkładki tłumiące pod elementami stopki łopatkowej. Szczególną uwagę poświęcił różnym konstrukcjom bandaży: prostego, wyposażonego w dwa druty tłumiące, wyposażonego w kołki trapezoidalne w kierunku skośnym, wyposażonego w kołki okrągłe prowadzone w kierunku skośnym, wyposażonego w kołek okrągły prowadzony równoległe do osi turbiny, kombi – kołek nieprzelotowy i drut tłumiący.

W **siódmym rozdziale zatytułowanym „Stacjonarna analiza przepływowa”** składającym się z czterech podrozdziałów Doktorant zastosował opracowane metody obliczeniowe do konstrukcji ostatniego stopnia kadłuba SP. Doktorant opisał kolejne kroki analizy przepływowej: opracowanie modelu, przyjęcie założeń, opis etapów zmiany konstrukcji; wynikiem jest przedstawienie wyników analizy. W ten sposób dopasował nowoprojektowaną łopatkę do najczęściej spotykanych parametrów pary w tego typu maszynach i w tej lokalizacji układu przepływowego oraz zmodernizował profil poprawiający sprawność i zwiększający generowaną moc. Całość analiz obliczeniowych wykonano w komercyjnym oprogramowaniu ANSYS CFX.

W pierwszej części opisał numeryczny model obliczeniowy, siatki obliczeniowe. Zwraca uwagę model obliczeniowy przecieku nadbandażowego. Drugą część poświęcił przedstawieniu założeń do obliczeń, w tym: parametrom pracy, ograniczeniom kanału przepływowego i połączeniom domen obliczeniowych, modelowaniu turbulencji.

W trzeciej części wykonał projektowanie wg. przyjętego algorytmu: założenie celu, do którego dąży się poprzez zmianę parametrów określonych w profilu; zastosowanie oprogramowania CAD Catia, w którym wprowadza się modyfikacje; zastosowanie programu BladeGen – program pośredniczący pomiędzy oprogramowaniem CAD i CAE za pomocą tworzone jest pióro łopatki w oparciu o wprowadzane szkice; budowa siatki TurboGrid – generowanie siatki numerycznej; zastosowanie programu ANSYS CFX – uzyskanie rozwiązania numerycznego. W nowoprojektowanej łopatkce ostatniego stopnia SP uwzględniono dwa etapy, w których przeprowadzono modernizację konstrukcji w ramach obliczeń przepływowych: dopasowanie liczby łopatek wirnikowych, zmodernizowanie profilu łopatki wirnikowej.

W końcowej części Autor zaprezentował wyniki obliczeń: dla łopatki wirnikowej o profilach wyjściowych, dla łopatki wirnikowej o profilach zmodernizowanych, porównał podstawowe parametry termodynamiczne łopatki przed i po modernizacji, dla przepływów nadbandażowych. Dokonał prezentacji graficznych. Zwrócił uwagę na redukcję stref strat po modernizacji. Wyniki modernizacji zamieścił w załącznikach I do V.

W **ósmym rozdziale zatytułowanym „Obliczenia wytrzymałościowe”** składającym się z ośmiu podrozdziałów Doktorant opisał proces przygotowania modelu, doboru rodzaju bandaży i określenia jego geometrii, stopki oraz obliczeń wytrzymałościowych: statycznych i samej dynamicznych łopatki i ułopatkowanej tarczy. Wskazał kryteria, wg. których weryfikował projektowaną łopatkę. Analiza wytrzymałościowa została wykonana w programie ANSYS, a modele 3D do obliczeń przygotowano w 3D – Catia.

W tym rozdziale Doktorant przedstawił procedurę analityczną i obliczeniową: model obliczeniowy MES, założenia do obliczeń wytrzymałościowych, kryteria oceny wyników analizy wytrzymałościowej, analiza obliczeń wytrzymałościowych dla łopatki ze standardowym

bandażem, analiza wytrzymałościowa łopatki dla wybranych wariantów bandaża, analiza modalna, analiza zmęczenia niskocyklowa LCF. Po wykonaniu tej procedury Autor zaprezentował rozwiązania finalne z uzasadnieniem jego wyboru.

Szczególną uwagę zwraca analiza stopki i bandaża łopatki. Dużo uwagi poświęcono wyborowi typu stopki, która zapewnia spełnienie warunków ograniczających modernizacji. Podobnie uczyniono dla skonstruowania połączeń dla drutów usztywniających związanych z bandażami. Temu celowi służy też analiza zmęczenia i modalna.

**W dziewiątym ostatnim rozdziale zatytułowanym „Podsumowanie i wnioski”** składającym się z trzech podrozdziałów pan Radosław Bondyra podsumował wyniki pracy badawczej zaprezentowane w rozprawie doktorskiej. Wskazał na zrealizowanie postawionego sobie celu zaprojektowania nowej łopatki o długości 500 mm spoza programu produkcyjnego. Łopatka spełniła założenia uzyskania wyższej mocy i sprawności. Jednocześnie spełniono warunki technologiczne do wbudowania łopatki w modernizowany układ przepływowy, którego część elementów nie podlegała zmianom. Pokazał metodę naukowego rozwiązania problemu konstrukcyjno-modernizacyjnego poprzez zbudowanie własnej metody. Przedstawił też wnioski ułatwiające procesy optymalizacyjne przy modernizacji elementów turbin parowych. Ten element pracy wskazuje na praktyczne zastosowanie zbudowanej metody. Doktorant przedstawił też swoje zamierzenia dotyczące rozwoju prac badawczych.

#### **4. Rozwiązanie postawionego problemu i użyte do tego metody**

Autor użył właściwych metod do realizacji postawionego zadania badania procesów termodynamiczno-przepływowych w układach łopatkowych turbin. Jednocześnie analizował problemy konstrukcyjne i wytrzymałościowe. W tym celu, wykorzystując poprawnie komercyjne programy obliczeniowe i znane fragmenty procedur konstrukcyjnych, zbudował metodę postępowania przy projektowaniu układów łopatkowych dla celów modernizacji konstrukcji. Model ten okazał się użyteczny w zastosowaniu do sformułowania wytycznych projektowych i płynących stąd wniosków dla zastosowań przemysłowych. Dla rozwiązania badawczego i inżynierskiego zastosował algorytmy obliczeń równań stanu dla rzeczywistych czynników roboczych.

Wykorzystał poprawnie algorytmy dostępne w programach komercyjnych obliczeń przepływowych 2D i 3D zebrane po wykonaniu obszernych obliczeń symulacyjnych analizowanych układów konstrukcyjnych. Uwzględnił złożone zjawiska fizyczne w przepływie, w tym te towarzyszące przepływowi nieszczelności w luzach konstrukcyjnych. Poprawnie je przeanalizował, a następnie zastosował do tworzenia i weryfikacji przepływu przez łopatkowe kanały przepływowe. Wykorzystał programy komercyjne ANSYS CFX, ANSYS Fluent, TurboGrid, CAD Catia i ANSYS Workbench 2019 i BladeGen. Trafnie analizował wyniki obliczeń programów numerycznych. Pokazał zalety użycia zbudowanej metody jako elementu procedury modernizacyjnej. Bardzo dobrze wykorzystał postprocesing graficzny do pokazania wyników pracy i wspomagania wyciągania wniosków z badań.

Autor wykazał się więc umiejętnością budowania i zastosowania termodynamiczno-przepływowych metod obliczeniowych do badania charakterystyk układów przepływowych tak złożonych i specyficznych jak te w stopniu turbinowym o długich łopatkach. Pokazał też dużą wiedzę w obszarze analizy wytrzymałości i dla obciążeń statycznych i dynamicznych. Właściwie odniósł się do modelowania skomplikowanych kanałów przepływowych silników cieplnych, uwzględniając też uwarunkowania technologiczne i ograniczenia geometryczno-konstrukcyjne. Poprawnie zastosował badania symulacyjne.

#### **5. Oryginalny dorobek Autora i przydatność uzyskanych wyników**

Autor rozwiązał oryginalne zadanie badawcze konstruowania i modernizacji skomplikowanych kanałów przepływowych obrotowych maszyn cieplnych. Szczególnie warta podkreślenia jest analiza przepływów nieszczelności w luzach konstrukcyjnych promieniowych

w trakcie ruchu obrotowego. Z punktu widzenia analizy wytrzymałościowej istotne są wyniki badań nad własnościami mocowań stopek i bandaży w warunkach silnych ograniczeń gabarytowych. Dotyczy to zarówno płaskiej jak i przestrzennej konfiguracji. Przedstawiona przez Autora metoda przy zastosowaniu w procedurach modernizacji konstrukcji stanowi o dodatkowych walorach jego badań. W pewnym sensie metoda jest wstępem do uzyskania rozwiązania ogólnego przynajmniej dla pewnego typoszeregu długich łopatek turbinowych o wysokich parametrach sprawnościowych pozwalających na uzyskanie powiększenia produkowanej mocy. Praca badawcza powiększyła wiedzę w obszarze nowoczesnych silników turbinowych średnich i dużych mocy. Potwierdziła ona również możliwość zastosowania metody w praktyce inżynierskiej projektowej.

## **6. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autora i znajomości współczesnej literatury?**

Autor wykazał się posiadaniem dostatecznej wiedzy jako badacz – naukowiec. Świadczy o tym przede wszystkim przegląd stanu wiedzy w dziedzinie przepływów w układach turbin średnich i dużych mocy i w zagadnieniach projektowych zwłaszcza przy modernizacji konstrukcji. Krytycznie przeanalizował te informacje we wstępie do opracowania metody. Na tym tle Autor potrafił wskazać na miejsce występowania luki w badaniach i uzasadnił potrzebę zajęcia się postawionym problemem.

Autor przywołał też liczne prace badawcze związane z reprezentowaną przez niego dziedziną, cytując je poprawnie w wielu miejscach rozprawy. Wykaz literatury obejmuje 87 pozycji. Cytowane są zarówno książki, monografie, jak i publikacje w czasopismach naukowych oraz referaty konferencyjne. Świadczy ten fakt o dobrej znajomości przez Doktoranta współczesnej literatury.

## **7. Słabe i mocne strony rozprawy**

Jako recenzent nie dopatrzyłem się w rozprawie zasadniczych uchybień merytorycznych.

Do mocnych stron rozprawy zaliczam następujące jej elementy:

- opracowanie metody projektowania układów łopatkowych turbin do celów modernizacji konstrukcji przy występujących silnych ograniczeniach gabarytowych i technologicznych,
- wykonanie obszernych obliczeń symulacyjnych w celu korekcji kształtu profili łopatkowych dla zapewnienia wysokiej sprawności i zwiększenia mocy stopni turbinowych. Obok poszerzenia bazy wiedzy naukowej daje to perspektywę zastosowania jego metody w pracy inżynierów projektantów,
- właściwą hierarchizację zadań wykonanych w trakcie realizacji zadań modernizacyjnych i redagowania pracy doktorskiej,
- zaproponowanie nowoczesnej i wystarczająco precyzyjnej dla praktyki inżynierskiej metody rozwiązania problemu modernizacji konstrukcji,
- wskazanie zastosowania swojej metody w procedurach optymalizacyjnych konstrukcji układów łopatkowych,
- wykorzystanie w badaniach obszernych zbiorów wyników z obliczeń symulacyjnych przepływowych i wytrzymałościowych, które wymagały poprawnego uszeregowania,
- uwzględnienie w badaniach nie tylko problemów fizycznych przepływu i wytrzymałości, ale również innych ograniczeń konstrukcyjnych i technologicznych,
- osiągnięte rezultaty są bliskie zastosowań przemysłowych.



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

- Str. 37 – w opisie metod projektowania wkradła się nieścisłość: Równanie równowagi promieniowej rzadko występuje przy projektowaniu indywidualnie. Natomiast jest jednym z czterech występujących w założeniach do tzw. metod zwijania obok równania zachowania energii, drugiej zasady termodynamiki w postaci równania Gibbsa, i zasady zachowania masy w postaci równania ciągłości. Natomiast wymienione przez Doktoranta deskrypcje wykorzystane są jako równania domykające i od nich wzięły się nazwy do metod projektowania układu łopatkowego.
- Str. 39 w opisie: do strat stopnia należy zaliczyć stratę wylotową.
- Str. 41 straty profilowe należą i do strat kierownicy i do strat wirnika.
- Str. 42 straty nazywane przez Doktoranta wtórnymi przyjęło się nazywać brzegowymi [np. Perycz]. Określenie straty wtórne powiązane jest raczej z metodami 3D i opisanymi przez Doktoranta przepływami wtórnymi.
- Str. 42 Na rys. 5.5 prezentowane są tylko straty w sąsiedztwie wirnika bez strat kierownicy; opis rysunku mówi zaś o stratach całego stopnia.
- Str. 42/43 lista przepływów wtórnych jest dłuższa.

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

- Str. 27 w tabelach przy rys. 3.4 i 3.5 powinno być „wysokość profilu”
- Str. 34 w przedostatnim akapicie powinno być „sprawdzenie”
- Str. 42 zamiast „oderwanie się strugi” powinno być „oderwanie strugi”.
- Str. 43 rys. 5.6 powinno być „nadbandażowy”.
- Str. 52 rys. 6.6 brak opisu osi.
- Str. 58 gramatyka: „Podczas analizowania wyników należy się jednak spodziewać większych naprężeń w obszarze kołka, gdyż ze względu na powtarzalność obróbki i wykonania zarówno otworu pod kołek jak i samego kołka, nie pozwoli na idealne przyleganie do siebie powierzchni.”.
- Str. 60 tytuł – powinno być „Stacjonarna analiza ...”.
- Str. 63 zamiast „cząsteczek wody” powinno być „cząsteczek pary”.
- Str. 73  $l_u$  jest określana jako „praca na obwodzie” lub „praca łopatkowa”.
- Str. 75 rys. 7.11 powinno być „liczba łopatek”.
- Str. 103 – powinno być „temperaturą”.
- Str. 113 gramatyka: „Problemy pojawiające się w okolicach spoiny łączącej kołek z bandażem i zmniejszającą się powierzchnią tarcia między tymi elementami były powodem innego elementu, wiążącego sąsiadujące ze sobą łopatki”.

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 pana Radosława Bondyry zatytułowana: „PRZEPLÝWOWO-DYNAMICZNA MODERNIZACJA ŁOPATKI WIRNIKOWEJ TURBINY PAROWEJ” jest ciekawą pracą naukową i użycową. Autor posłużył się poprawnie rozbudowanymi narzędziami analitycznymi i numerycznymi dla rozwiązania ważnego zagadnienia naukowego. Uzyskał 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 inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna stawia rozprawom doktorskim.**

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



**Jerzy Głuch**