Prof. dr hab. inż. Andrzej ŻYLUK
Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
tel.: +48261-851-300
e-mail: andrzej.zyluk@itwl.pl

Warszawa, 03.11.2026 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wiktora HOFFMANNA
pt.„Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle”
wykonanej na
Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej
pod kierownictwem
dr hab. inż. Magdy Joachimiak, prof. PP

1. Podstawa opracowania

Niniejsza recenzja została sporządzona na podstawie Uchwały nr 34/N/2025/2026 Rady Dyscypliny Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Poznańskiej z dnia 7 lipca 2026 r., dotyczącej powołania recenzentów w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora mgr. inż. Wiktorowi Hoffmannowi.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr. inż. Wiktora Hoffmanna pt. „Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle”, opracowana na Politechnice Poznańskiej, na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki, w Instytucie Energetyki Cieplnej, w 2026 roku.

Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem dr hab. inż. Magdy Joachimiak, prof. PP, pełniącej funkcję promotora. Funkcję promotora pomocniczego sprawował dr inż. Bartosz Ziegler.

2. Ocena doboru tematyki rozprawy

Temat rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wiktora Hoffmanna pt. „Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle” należy uznać za aktualny, naukowo uzasadniony oraz odpowiadający problematyce badawczej właściwej dla nauk inżynieryjno-technicznych, w szczególności mechaniki płynów, dynamiki przepływów ściśliwych oraz zagadnień związanych z funkcjonowaniem lotniczych układów napędowych. Podjęta problematyka koncentruje się na eksperymentalnej identyfikacji właściwości dynamicznych dwuprzewężeniowej dyszy strumieniowej (Dual-Throat Nozzle – DTN), umożliwiającej płynowe sterowanie wektorem ciągu bez konieczności stosowania ruchomych elementów mechanicznych dyszy.

Zasadność wyboru tematyki rozprawy wynika z potrzeby doskonalenia metod projektowania, modelowania i oceny właściwości funkcjonalnych układów sterowania wektorem ciągu, w których szczególnego znaczenia nabierają szybkość odpowiedzi dynamicznej, stabilność przepływu oraz niezawodność działania. Rozwiązania wykorzystujące odpowiednio kształtowany strumień wtórny do zmiany kierunku przepływu głównego stanowią alternatywę dla konwencjonalnych układów mechanicznych, oferując możliwość ograniczenia złożoności konstrukcyjnej oraz poprawy właściwości eksploatacyjnych systemów napędowych.

Przedmiot rozprawy pozostaje w bezpośrednim związku z zagadnieniami przepływów nieustalonych, oddziaływania strumieni gazowych, rozkładu ciśnienia w kanałach przepływowych oraz identyfikacji charakterystyk dynamicznych układów gazodynamicznych. Szczególnie istotne jest podjęcie problemu eksperymentalnego określenia odpowiedzi dynamicznej dyszy DTN na uruchomienie wtrysku strumienia wtórnego, a także wyznaczenia częstotliwości i amplitud pulsacji ciśnienia występujących na jej wewnętrznych powierzchniach. Zagadnienia te wymagają uwzględnienia złożonych zjawisk aerodynamicznych, których opis wyłącznie na podstawie uśrednionych parametrów przepływu może być niewystarczający.

Na podkreślenie zasługuje właściwe rozpoznanie luki badawczej wynikającej z ograniczonej dostępności wyników badań eksperymentalnych dotyczących nieustalonych stanów pracy dwuprzewężeniowych dysz strumieniowych. Dotychczasowe badania koncentrowały się przede wszystkim na analizie wpływu parametrów geometrycznych i przepływowych na skuteczność sterowania wektorem ciągu oraz na określaniu charakterystyk przepływu w warunkach ustalonych. Zagadnienia odpowiedzi dynamicznej rozpatrywano natomiast głównie z wykorzystaniem metod numerycznych. W tym kontekście eksperymentalne wyznaczenie czasu opóźnienia i stałej czasowej odpowiedzi dyszy stanowi uzasadniony kierunek badań, umożliwiający uzupełnienie dotychczasowego stanu wiedzy.

Uważam, że podjęcie przez mgr. inż. Wiktora Hoffmanna problematyki eksperymentalnego badania właściwości dynamicznych dwuprzewężeniowej dyszy strumieniowej należy uznać za w pełni uzasadnione zarówno pod względem poznawczym, jak i aplikacyjnym. Przedmiot badań odpowiada aktualnym kierunkom rozwoju układów płynowego sterowania wektorem ciągu oraz mieści się w obszarze nauk inżynieryjno-technicznych. Szczególnie wartościowe jest ukierunkowanie rozprawy na eksperymentalną identyfikację zjawisk nieustalonych, dotychczas rozpatrywanych przede wszystkim w badaniach numerycznych. Zakres i stopień złożoności podjętej problematyki odpowiadają wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim, a uzyskane wyniki mogą stanowić wkład w rozwój metod analizy i modelowania dynamicznych właściwości układów przepływowych.

3. Ocena struktury pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Wiktora Hoffmanna pt. „Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle” została opracowana w języku angielskim i obejmuje:

- 203 strony dokumentu, w tym stronę tytułową, oświadczenie autora, streszczenia w języku polskim i angielskim, spis treści, wykazy rysunków i tabel oraz wykaz symboli i oznaczeń;
- 7 rozdziałów stanowiących zasadniczą część merytoryczną rozprawy;
- bibliografię obejmującą 102 krajowe i zagraniczne publikacje naukowe oraz techniczne;
- 11 załączników, oznaczonych literami od A do K, zawierających dokumentację konstrukcyjną, materiały dotyczące aparatury pomiarowej oraz kody programów wykorzystywanych do przetwarzania i analizy danych.

Zasadnicza treść rozprawy została przedstawiona w siedmiu rozdziałach, których układ odpowiada kolejnym etapom realizacji procesu badawczego. Uwzględniając charakter prezentowanych zagadnień, można wyróżnić następujące części:

- wprowadzającą i problemowo-metodologiczną – rozdział 1,
- teoretyczną – rozdział 2,
- analityczno-numeryczną – rozdział 3,

- eksperymentalno-metodyczną – rozdział 4,
- wynikową i analityczną – rozdział 5 i 6,
- podsumowującą – rozdział 7.

Część wprowadzająca i teoretyczna stanowi podstawę do sformułowania problematyki badawczej oraz uzasadnienia przyjętego kierunku badań. Przedstawiono w niej rozwój metod płynowego sterowania wektorem ciągu, charakterystykę dwuprzewężeniowych dysz strumieniowych oraz analizę dotychczasowych osiągnięć naukowych. Na tej podstawie wskazano lukę badawczą dotyczącą eksperymentalnego rozpoznania właściwości dynamicznych dysz DTN.

Zasadniczą część rozprawy stanowią analizy numeryczne i badania eksperymentalne, obejmujące modelowanie przepływu, opracowanie i wykorzystanie stanowiska badawczego, pomiary ciśnienia oraz identyfikację charakterystyk dynamicznych dyszy. Przedstawiono również metody przetwarzania danych pomiarowych, analizę odpowiedzi przejściowej układu oraz ocenę zgodności wyników eksperymentalnych z rezultatami symulacji numerycznych. Przyjęta sekwencja zagadnień zapewnia właściwe powiązanie poszczególnych etapów postępowania badawczego.

Rozprawę zamyka część podsumowująca, zawierająca najważniejsze wyniki i wnioski oraz propozycje dalszych kierunków badań. Uzupełnienie opracowania stanowią załączniki dokumentujące zastosowane rozwiązania konstrukcyjne, pomiarowe i obliczeniowe.

Strukturę rozprawy należy ocenić jako logiczną, spójną i zasadniczo poprawną pod względem merytorycznym. Przyjęty podział treści zapewnia przejrzystość prezentowanego materiału oraz umożliwia prześledzenie kolejnych etapów realizacji badań. Tytuły rozdziałów odpowiadają ich zawartości, a sposób uporządkowania zagadnień nie budzi istotnych zastrzeżeń.

Pewne uwagi można natomiast sformułować w odniesieniu do sposobu przedstawienia zagadnień metodologicznych, które zostały rozproszone w poszczególnych rozdziałach. Bardziej jednoznaczne wyodrębnienie problemu naukowego, założeń badawczych, metod ich weryfikacji oraz kryteriów oceny wyników przyczyniłoby się do zwiększenia przejrzystości metodologicznej rozprawy. Wskazane byłoby również wyraźniejsze przedstawienie zależności pomiędzy analizami numerycznymi a zakresem przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Pod względem językowym i redakcyjnym rozprawa została przygotowana na zasadniczo właściwym poziomie. Doktorant posługuje się terminologią techniczną odpowiadającą rozpatrywanej problematyce, a zamieszczone rysunki, schematy, wykresy i zestawienia tabelaryczne stanowią odpowiednie uzupełnienie prezentowanych treści. Pozytywnie należy również ocenić zamieszczenie w załącznikach kodów programów wykorzystywanych do analizy danych pomiarowych.

W opracowaniu występują jednak uchybienia językowe, stylistyczne i redakcyjne, obejmujące nieprecyzyjne sformułowania, błędy gramatyczne i składniowe oraz niejednolity zapis wybranych terminów i oznaczeń technicznych. Niedoskonałości te miejscami ograniczają czytelność wywodu, jednak nie utrudniają w istotnym stopniu jego interpretacji i oceny merytorycznej.

Strukturę, układ merytoryczny oraz sposób redakcyjnego opracowania rozprawy doktorskiej oceniam pozytywnie. Przyjęta organizacja treści zapewnia logiczną ciągłość wywodu oraz właściwe powiązanie analiz teoretycznych, numerycznych i badań eksperymentalnych. Stwierdzone niedoskonałości dotyczą przede wszystkim prezentacji zagadnień metodologicznych oraz wybranych aspektów językowych i redakcyjnych.

Nie mają one jednak zasadniczego wpływu na ogólną ocenę struktury rozprawy ani na możliwość przeprowadzenia jej szczegółowej oceny merytorycznej.

4. Ocena zakresu, celu i treści rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Wiktora Hoffmanna pt. „Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle" dotyczy eksperymentalnej identyfikacji właściwości dynamicznych dwuprzewężeniowej dyszy strumieniowej (Dual-Throat Nozzle – DTN), przeznaczonej do płynowego sterowania wektorem ciągu. Zasadniczym celem pracy jest określenie charakterystyk odpowiedzi przejściowej dyszy na uruchomienie wtrysku strumienia wtórnego oraz identyfikacja częstotliwości i amplitud pulsacji ciśnienia występujących na jej wewnętrznych powierzchniach. Realizacja przyjętego celu obejmowała analizy teoretyczne i numeryczne, opracowanie stanowiska eksperymentalnego, przeprowadzenie badań oraz ilościową analizę uzyskanych wyników.

W rozdziale pierwszym Doktorant przedstawił rozwój metod sterowania wektorem ciągu oraz dokonał przeglądu stanu wiedzy dotyczącego rozwiązań wykorzystujących płynowe oddziaływanie na strumień główny. Szczególną uwagę poświęcono dyszom DTN, ich właściwościom funkcjonalnym oraz dotychczasowym badaniom numerycznym i eksperymentalnym. Na podstawie przeprowadzonej analizy wskazano lukę badawczą dotyczącą ograniczonej dostępności eksperymentalnych charakterystyk dynamicznych tego rodzaju dysz.

Przedstawiony przegląd stanowi właściwą podstawę do uzasadnienia podjętej problematyki. Jego wartość poznawczą zwiększyłoby jednak bardziej systematyczne porównanie dotychczasowych badań, uwzględniające zastosowane metody, warunki przepływowe oraz uzyskane rezultaty. Z metodologicznego punktu widzenia wskazane byłoby również jednoznaczne sformułowanie hipotezy badawczej i kryteriów jej weryfikacji.

Sformułowany cel rozprawy należy ocenić pozytywnie ze względu na jego charakter poznawczy, jednoznaczność oraz możliwość weryfikacji eksperymentalnej. Rozdział pierwszy stanowi odpowiednie wprowadzenie do dalszych rozważań, a zidentyfikowana luka badawcza uzasadnia przyjęty kierunek badań.

Rozdział drugi obejmuje podstawy teoretyczne płynowego sterowania wektorem ciągu oraz charakterystykę zjawisk gazodynamicznych występujących w dyszach DTN. Doktorant omówił mechanizmy oddziaływania strumienia wtórnego na przepływ główny, parametry charakteryzujące skuteczność wektorowania oraz zależności opisujące właściwości przepływu.

Przedstawione rozważania zapewniają właściwe podstawy fizyczne do interpretacji wyników badań. Pewnym ograniczeniem jest natomiast stosunkowo niewielki zakres analizy zagadnień związanych z modelowaniem dynamiki układów przepływowych. W szczególności wskazane byłoby szersze uzasadnienie przyjęcia modelu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem oraz określenie zakresu jego stosowalności w warunkach występowania złożonych zjawisk niestacjonarnych.

Rozdział drugi oceniam pozytywnie pod względem poprawności przedstawionych podstaw teoretycznych, wskazując jednocześnie na potrzebę pełniejszego uzasadnienia modeli wykorzystywanych do identyfikacji parametrów dynamicznych dyszy.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił geometrię analizowanej dyszy DTN oraz wyniki numerycznego modelowania przepływu. Omówiono przyjęte założenia obliczeniowe, warunki brzegowe oraz rezultaty analiz CFD dotyczących struktury przepływu i rozkładu ciśnienia na wewnętrznych powierzchniach dyszy.

Za uzasadnione należy uznać wykorzystanie geometrii referencyjnej opisanej w literaturze oraz powiązanie analiz numerycznych z programem badań eksperymentalnych. Przyjęte podejście umożliwiło rozpoznanie podstawowych mechanizmów przepływowych oraz przygotowanie materiału porównawczego do interpretacji wyników pomiarów.

Pewne zastrzeżenia dotyczą zakresu weryfikacji modelu numerycznego, w szczególności oceny niezależności rozwiązania od dyskretyzacji obszaru obliczeniowego, wpływu przyjętego modelu turbulencji oraz niepewności obliczeniowej. Wskazane byłoby również zastosowanie ilościowych miar zgodności wyników numerycznych z eksperymentalnymi.

Rozdział trzeci oceniam pozytywnie, uznając przeprowadzone analizy CFD za wartościowe uzupełnienie badań eksperymentalnych. Pełniejsza walidacja modelu obliczeniowego zwiększyłaby jednak wiarygodność przedstawionych rezultatów.

Rozdział czwarty poświęcono konstrukcji stanowiska eksperymentalnego, zastosowanej aparaturze pomiarowej oraz procedurom realizacji badań. Podstawowym elementem stanowiska jest tunel typu tuba Ludwiega, umożliwiający prowadzenie pomiarów w warunkach krótkotrwałego przepływu gazu. Doktorant przedstawił również konstrukcję modelu dyszy, układy zasilania strumienia głównego i wtórnego oraz system rejestracji sygnałów ciśnienia.

Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie stanowiska umożliwiającego identyfikację szybkich zmian ciśnienia i zjawisk niestacjonarnych. Przedstawione rozwiązania potwierdzają umiejętność samodzielnego rozwiązywania złożonych problemów technicznych i eksperymentalnych.

Zastrzeżenia dotyczą przede wszystkim niewystarczająco rozbudowanej ilościowej oceny niepewności pomiarowych oraz wpływu właściwości układu uruchamiania wtrysku wtórnego na identyfikowane parametry dynamiczne. Rozdzielenie opóźnienia wynikającego z działania układu wymuszającego od procesów gazodynamicznych zachodzących w dyszy pozwoliłoby na bardziej jednoznaczną interpretację uzyskanych wyników.

Rozdział czwarty oceniam wysoko pod względem zakresu prac eksperymentalnych, stopnia złożoności stanowiska oraz poprawności przyjętych rozwiązań pomiarowych.

W rozdziale piątym Doktorant przedstawił metody przetwarzania danych eksperymentalnych oraz identyfikacji parametrów odpowiedzi dynamicznej dyszy. Opracowana procedura obejmuje przygotowanie sygnałów pomiarowych, ich filtrację z wykorzystaniem metody Savitzky’ego-Golaya oraz dopasowanie modelu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem. Umożliwiło to wyznaczenie czasu opóźnienia, stałej czasowej oraz charakterystycznego czasu odpowiedzi układu.

Za wartościowe należy uznać opracowanie metodyki pozwalającej na oddzielenie średniej odpowiedzi przejściowej od pulsacyjnych składowych ciśnienia. Pozytywnie oceniam również sprawdzenie wpływu parametrów filtracji na otrzymywane wyniki.

Pewne uwagi dotyczą natomiast zakresu weryfikacji przyjętego modelu dynamicznego. W szczególności wskazane byłoby przeprowadzenie analizy reszt dopasowania, określenie niepewności identyfikowanych parametrów oraz porównanie zastosowanego modelu z alternatywnymi opisami odpowiedzi układu. Należy podkreślić, że wysoka wartość współczynnika determinacji nie stanowi samodzielnego potwierdzenia poprawności fizycznej modelu.

Rozdział piąty oceniam pozytywnie, uznając opracowaną procedurę analizy sygnałów i identyfikacji parametrów dynamicznych za istotny element dorobku badawczego Doktoranta.

Rozdział szósty stanowi zasadniczą część wynikową rozprawy. Przedstawiono w nim rezultaty eksperymentalnej identyfikacji odpowiedzi dynamicznej dyszy DTN, analizy rozkładu ciśnienia oraz badań częstotliwościowych pulsacji występujących w przepływie.

Badania przeprowadzono dla stosunku ciśnień NPR = 2,8 oraz udziału strumienia wtórnego MFR = 3%. Wyznaczone wartości czasu opóźnienia odpowiedzi ciśnienia mieściły się w przedziale 0,01640–0,01832 [s], natomiast stałej czasowej w przedziale 0,00079–0,00244 [s]. Uzyskane rezultaty stanowią wartościowe dane eksperymentalne dotyczące właściwości dynamicznych dyszy DTN.

Przeprowadzone pomiary potwierdziły również występowanie zmian rozkładu ciśnienia związanych z uruchomieniem wtrysku wtórnego. Porównanie wyników eksperymentalnych z analizami CFD wykazało zgodność ogólnych tendencji przepływowych, przy występowaniu lokalnych rozbieżności.

Analiza częstotliwościowa potwierdziła obecność pulsacji ciśnienia zarówno przed uruchomieniem wtrysku wtórnego, jak i po jego aktywacji. Dominujące częstotliwości wynosiły odpowiednio około 1100–1300 [Hz] oraz 800–1400 [Hz], co wskazuje na istotny udział zjawisk niestacjonarnych w funkcjonowaniu badanego układu.

Na szczególnie pozytywną ocenę zasługuje eksperymentalne wyznaczenie charakterystyk dynamicznych dyszy oraz połączenie analizy czasowej i częstotliwościowej. Uzyskane wyniki stanowią istotne uzupełnienie dotychczasowego stanu wiedzy, opartego w znacznym stopniu na badaniach numerycznych.

Niezależnie od wskazanych walorów należy zauważyć, że wyniki odnoszą się do wybranej geometrii dyszy i ograniczonego zakresu parametrów przepływowych. Ponadto zróżnicowana jakość dopasowania modelu dynamicznego, w tym stosunkowo niska wartość $R^2 = 0,44$ dla jednego z punktów pomiarowych, wskazuje na potrzebę dalszej weryfikacji przyjętego opisu matematycznego.

Istotnym ograniczeniem jest również brak bezpośredniego eksperymentalnego pomiaru kąta odchylenia wektora ciągu. Z tego względu uzyskane rezultaty umożliwiają ocenę zmian rozkładu ciśnienia i właściwości dynamicznych przepływu, lecz nie stanowią bezpośredniej podstawy do ilościowego określenia skuteczności wektorowania ciągu.

Uważam, że wskazane byłoby rozszerzenie programu badań oraz uzupełnienie wyników o analizę statystyczną, obejmującą ocenę powtarzalności pomiarów, niepewności identyfikowanych parametrów oraz przedziały ufności.

Rozdział szósty oceniam wysoko pod względem wartości poznawczej uzyskanych rezultatów oraz ich znaczenia dla realizacji celu rozprawy. Przeprowadzone badania stanowią oryginalny wkład w eksperymentalne rozpoznanie właściwości dynamicznych dysz DTN. Wskazane ograniczenia dotyczą przede wszystkim możliwości uogólnienia wyników i nie podważają zasadniczej wartości przeprowadzonych badań.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac, najważniejsze wnioski oraz propozycje dalszych kierunków badań. Doktorant wskazał jako zasadnicze osiągnięcia opracowanie stanowiska eksperymentalnego i metodyki analizy danych, wyznaczenie parametrów dynamicznych dyszy oraz identyfikację pulsacji ciśnienia.

Przedstawione wnioski pozostają zasadniczo zgodne z zakresem zrealizowanych badań. Pewne zastrzeżenia dotyczą natomiast możliwości uogólnienia wyznaczonych bezwymiarowych parametrów czasowych na inne konfiguracje dysz i warunki przepływowe. Takie zastosowanie wymaga dalszej weryfikacji eksperymentalnej.

Rozdział siódmy oceniam pozytywnie. Przedstawione podsumowanie właściwie odzwierciedla osiągnięte rezultaty, natomiast pełniejsze wskazanie ograniczeń przeprowadzonych badań pozwoliłoby na bardziej jednoznaczne określenie zakresu stosowalności uzyskanych wyników.

Bibliografia rozprawy obejmuje publikacje naukowe i techniczne dotyczące mechaniki płynów ściśliwych, płynowego sterowania wektorem ciągu, modelowania numerycznego oraz eksperymentalnych metod pomiarowych. Dobór literatury odpowiada zasadniczo zakresowi

tematycznemu pracy i stanowi właściwą podstawę do przeprowadzonych analiz. Pewne uwagi dotyczą ograniczonego wykorzystania publikacji poświęconych identyfikacji układów dynamicznych, ocenie niepewności pomiarowych oraz statystycznej analizie wyników eksperymentalnych. Szersze uwzględnienie tych zagadnień zwiększyłoby wartość metodologiczną rozprawy.

Dobór literatury oceniam jako zasadniczo właściwy, przy czym wskazane byłoby pełniejsze odniesienie zastosowanych metod analitycznych i badawczych do współczesnego dorobku naukowego w zakresie identyfikacji dynamicznej i metrologii.

Podsumowując, ocenę zakresu, celu i treści rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że Doktorant zrealizował zasadnicze zadania badawcze wynikające z przyjętego celu pracy. Za najważniejsze osiągnięcia uznaję opracowanie stanowiska eksperymentalnego i metodyki analizy sygnałów pomiarowych, eksperymentalne wyznaczenie parametrów odpowiedzi dynamicznej dyszy DTN oraz identyfikację niestacjonarnych pulsacji ciśnienia. Uzyskane wyniki stanowią oryginalny wkład w rozwój eksperymentalnych metod badania właściwości dynamicznych układów przepływowych. Stwierdzone niedoskonałości dotyczą przede wszystkim zakresu weryfikacji modeli, ilościowej oceny niepewności pomiarowych oraz ograniczonej możliwości uogólnienia uzyskanych rezultatów. Nie mają one jednak zasadniczego wpływu na pozytywną ocenę merytoryczną rozprawy. W mojej ocenie przedstawiona praca spełnia wymagania dotyczące oryginalności i wartości poznawczej badań naukowych, a uzyskane rezultaty stanowią wartościowy wkład w rozwój wiedzy dotyczącej dynamiki przepływów nieustalonych oraz płynowego sterowania wektorem ciągu.

5. Ocena merytoryczna rozprawy

W mojej ocenie zasadniczym osiągnięciem mgr. inż. Wiktora Hoffmanna jest eksperymentalne wyznaczenie charakterystyk dynamicznych dwuprzewężeniowej dyszy strumieniowej (Dual-Throat Nozzle – DTN), przeznaczonej do płynowego sterowania wektorem ciągu, oraz identyfikacja zjawisk niestacjonarnych występujących podczas jej pracy.

Przedstawione rezultaty są efektem prac teoretycznych, numerycznych i eksperymentalnych, obejmujących analizę mechanizmów przepływowych, opracowanie stanowiska badawczego, przygotowanie metodyki pomiarowej oraz ilościową ocenę odpowiedzi dyszy na uruchomienie wtrysku strumienia wtórnego.

Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczam:

- przeprowadzenie analizy stanu wiedzy dotyczącego płynowego sterowania wektorem ciągu oraz identyfikację luki badawczej w zakresie eksperymentalnego rozpoznania właściwości dynamicznych dysz DTN;
- opracowanie modelu geometrycznego dyszy i przeprowadzenie analiz CFD umożliwiających określenie charakterystyk przepływowych oraz rozkładu ciśnienia na jej wewnętrznych powierzchniach;
- opracowanie i uruchomienie stanowiska eksperymentalnego wykorzystującego tunel typu tuba Ludwiega, umożliwiającego prowadzenie pomiarów w warunkach krótkotrwałego przepływu gazu;
- opracowanie metodyki przetwarzania sygnałów pomiarowych oraz identyfikacji parametrów odpowiedzi dynamicznej z wykorzystaniem modelu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem;
- eksperymentalne wyznaczenie czasu opóźnienia i stałej czasowej odpowiedzi dyszy na uruchomienie wtrysku wtórnego;

- identyfikację częstotliwości i amplitud pulsacji ciśnienia oraz określenie zmian jego rozkładu związanych z oddziaływaniem strumienia wtórnego na przepływ główny;
- przeprowadzenie analizy porównawczej wyników eksperymentalnych i numerycznych, umożliwiającej ocenę zgodności przewidywanych i zmierzonych charakterystyk przepływowych.

Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie metodyki umożliwiającej ilościową identyfikację odpowiedzi przejściowej dyszy DTN w warunkach występowania pulsacji ciśnienia. Uzyskane dane eksperymentalne stanowią istotne uzupełnienie dotychczasowych badań, koncentrujących się przede wszystkim na charakterystykach przepływu ustalonego i analizach numerycznych. Ich wartość poznawcza wynika z możliwości określenia parametrów czasowych badanego układu oraz rozpoznania niestacjonarnego charakteru przepływu.

Przyjętą koncepcję badawczą należy ocenić jako właściwą i odpowiadającą złożoności rozpatrywanego problemu. Zastosowane metody pozostają w logicznym związku z celem rozprawy, a ich wykorzystanie potwierdza umiejętność samodzielnego planowania i realizacji badań eksperymentalnych oraz interpretacji uzyskanych wyników.

Pewne zastrzeżenia dotyczą zakresu weryfikacji przyjętych modeli oraz możliwości uogólnienia rezultatów. W szczególności wskazane byłoby pełniejsze określenie niepewności identyfikowanych parametrów, rozdzielenie wpływu układu wymuszającego od właściwości dynamicznych dyszy oraz rozszerzenie badań na zróżnicowane warunki przepływowe. Istotnym uzupełnieniem byłoby również bezpośrednie eksperymentalne określenie kąta odchylenia wektora ciągu, umożliwiające powiązanie charakterystyk dynamicznych z efektywnością procesu wektorowania.

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że zasadniczy cel rozprawy został osiągnięty. Doktorant wykazał się odpowiednim przygotowaniem teoretycznym, znajomością metod modelowania przepływów ściśliwych oraz umiejętnością rozwiązywania złożonych problemów badawczych. Przedstawione wyniki stanowią oryginalny dorobek naukowy, którego znaczenie wykracza poza bezpośrednią charakterystykę badanego obiektu i może stanowić podstawę dalszego rozwoju metod identyfikacji dynamicznej układów przepływowych.

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wiktora Hoffmanna, stwierdzam, że przedstawione opracowanie stanowi wartościowe osiągnięcie naukowe w zakresie eksperymentalnych badań właściwości dynamicznych dysz DTN. Oryginalność uzyskanych rezultatów, poprawność przyjętej koncepcji badawczej oraz zakres wykonanych prac potwierdzają zdolność Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Wskazane ograniczenia metodologiczne nie podważają zasadniczej wartości poznawczej rozprawy, której poziom merytoryczny oceniam bardzo dobrze.

6. Uwagi szczegółowe

Zawartość merytoryczną rozprawy oceniam bardzo dobrze. Mimo pozytywnej oceny podczas czytania rozprawy nasunęły mi się pewne wątpliwości:

1. Pewne zastrzeżenia budzi zakres uzasadnienia zastosowania modelu inercyjnego pierwszego rzędu z opóźnieniem do opisu odpowiedzi dynamicznej dyszy DTN. Przyjęty model stanowi użyteczne przybliżenie matematyczne, jednak nie uwzględnia bezpośrednio złożonych zjawisk gazodynamicznych, obejmujących między innymi separację przepływu, oddziaływania falowe oraz niestacjonarne zmiany struktury przepływu. Na szczególną uwagę zasługuje zróżnicowana jakość dopasowania modelu

do przebiegów eksperymentalnych, w tym wartość współczynnika determinacji $R^2 = 0{,}44$ uzyskana dla jednego z punktów pomiarowych. Wynik ten wskazuje na ograniczoną zdolność przyjętego modelu do odwzorowania lokalnej odpowiedzi ciśnienia. Zasadne byłoby przeprowadzenie analizy reszt dopasowania oraz porównanie zastosowanego modelu z alternatywnymi modelami dynamicznymi. Pozwoliłoby to na bardziej jednoznaczne określenie zakresu jego stosowalności oraz wiarygodności fizycznej interpretacji wyznaczonych parametrów.

2. Istotnym ograniczeniem przedstawionej metodyki badawczej jest brak kompleksowej analizy propagacji niepewności pomiarowych na wartości identyfikowanych parametrów dynamicznych. W szczególności dotyczy to wpływu charakterystyk przetworników ciśnienia, właściwości torów pomiarowych, synchronizacji sygnałów oraz przyjętych procedur przetwarzania danych. Pomimo przeprowadzenia analizy wrażliwości wyników na parametry filtracji, nie przedstawiono pełnej ilościowej oceny niepewności czasu opóźnienia i stałej czasowej. Utrudnia to określenie istotności różnic pomiędzy wartościami uzyskanymi w poszczególnych punktach pomiarowych. Wskazane byłoby uzupełnienie wyników o przedziały ufności, ocenę powtarzalności pomiarów oraz analizę wpływu poszczególnych źródeł niepewności na końcowe rezultaty identyfikacji.
3. W rozdziale 5.2.3 rozprawy, dotyczącym przetwarzania sygnałów pomiarowych z wykorzystaniem filtru Savitzky'ego-Golaya, nie określono jednoznacznie podstawowych parametrów filtracji, tj. długości okna oraz stopnia wielomianu aproksymacyjnego. Wartości te można ustalić dopiero na podstawie analizy kodu źródłowego zamieszczonego w załączniku H. W procedurze identyfikacji odpowiedzi dynamicznej zastosowano okno obejmujące 307 próbek (około 6 ms) oraz wielomian drugiego stopnia. Z uwagi na istotny wpływ parametrów filtracji na kształt przebiegów przejściowych, a tym samym na wiarygodność wyznaczanych wartości czasu opóźnienia i stałej czasowej, wskazane byłoby ich jednoznaczne przedstawienie w zasadniczej części rozprawy. Ponadto zasadne byłoby ilościowe udokumentowanie wyników przeprowadzonej analizy wrażliwości, umożliwiające ocenę wpływu przyjętych parametrów filtracji na uzyskane charakterystyki dynamiczne dyszy DTN.
4. Przeprowadzona analiza częstotliwościowa umożliwiła identyfikację dominujących składowych widmowych pulsacji ciśnienia występujących podczas pracy dyszy DTN. W ograniczonym zakresie przedstawiono jednak interpretację mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za powstawanie zidentyfikowanych częstotliwości. W szczególności wskazane byłoby określenie związku pomiędzy charakterystykami widmowymi a strukturą przepływu, w tym zjawiskami separacji, recyrkulacji oraz oddziaływań falowych. Pogłębienia wymaga również analiza wpływu właściwości dynamicznych torów pomiarowych na rejestrowane sygnały. Pełniejsze wyjaśnienie genezy obserwowanych pulsacji zwiększyłoby wartość poznawczą wyników i umożliwiłoby ich szersze wykorzystanie w modelowaniu zjawisk niestacjonarnych.

Powyższe uwagi nie wpływają na moją pozytywną ocenę merytoryczną rozprawy, a jedynie utrudniają zrozumienie jej fragmentów.

7. Wniosek końcowy oceny rozprawy

Przedstawioną do recenzji rozprawę doktorską mgr. inż. Wiktora HOFFMANNA pt. „Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle" oceniam pozytywnie. Rozprawa została opracowana na bardzo dobrym poziomie merytorycznym i stanowi wartościowe osiągnięcie naukowe w zakresie eksperymentalnych badań właściwości dynamicznych dysz przeznaczonych do płynowego sterowania wektorem ciągu.

Podjęta problematyka dotyczy złożonych zagadnień mechaniki płynów ściśliwych, w szczególności identyfikacji niestacjonarnych zjawisk przepływowych oraz charakterystyk odpowiedzi dynamicznej dwuprzewężeniowych dysz strumieniowych.

Treść rozprawy potwierdza szeroką wiedzę specjalistyczną Doktoranta, znajomość metod modelowania przepływów gazowych oraz umiejętność wykorzystania analiz teoretycznych, obliczeń numerycznych i badań eksperymentalnych do rozwiązywania złożonych problemów naukowych i technicznych. Na szczególne podkreślenie zasługuje kompleksowość zrealizowanych prac, obejmujących opracowanie modelu geometrycznego i numerycznego dyszy, przygotowanie specjalistycznego stanowiska badawczego wykorzystującego tunel typu tuba Ludwiega, opracowanie metodyki pomiarowej oraz przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników.

Za najważniejsze osiągnięcie naukowe Doktoranta uznaję eksperymentalne wyznaczenie parametrów odpowiedzi dynamicznej dyszy DTN na uruchomienie wtrysku strumienia wtórnego oraz identyfikację charakterystyk pulsacji ciśnienia występujących podczas jej pracy. Istotną wartość poznawczą stanowi opracowanie procedury przetwarzania sygnałów pomiarowych i identyfikacji parametrów dynamicznych, umożliwiającej ilościową ocenę przebiegów przejściowych w warunkach krótkotrwałego przepływu gazu. Uzyskane rezultaty uzupełniają dotychczasowy stan wiedzy, w którym badania właściwości dynamicznych dysz DTN opierały się w znacznej mierze na analizach numerycznych.

Przeprowadzone badania dostarczyły również wartościowych informacji dotyczących zmian rozkładu ciśnienia na wewnętrznych powierzchniach dyszy oraz występowania niestacjonarnych zjawisk przepływowych przed uruchomieniem wtrysku wtórnego i po jego aktywacji. Przedstawione wyniki mogą stanowić podstawę dalszego doskonalenia metod modelowania dynamicznego oraz projektowania układów płynowego sterowania wektorem ciągu.

Pomimo wskazanych w recenzji uwag dotyczących zakresu walidacji przyjętych modeli, niepewności identyfikowanych parametrów oraz możliwości uogólnienia uzyskanych rezultatów, przedstawione osiągnięcia potwierdzają umiejętność samodzielnego planowania, realizacji i interpretacji złożonych badań eksperymentalnych. Sformułowane zastrzeżenia nie podważają zasadniczej wartości naukowej rozprawy ani oryginalności uzyskanych wyników.

Reasumując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Wiktora HOFFMANNA stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego eksperymentalnej identyfikacji właściwości dynamicznych dwuprzewężeniowych dysz strumieniowych. Przedstawione opracowanie potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz wykazuje jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tym samym rozprawa spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.).

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wiktora HOFFMANNA pt. „Experimental Research of Dual-Throat Fluidic Thrust Vectoring Nozzle" w postępowaniu o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, oraz o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej

Uwzględniając wysoki poziom merytoryczny rozprawy, oryginalność uzyskanych wyników eksperymentalnych oraz istotny wkład Doktoranta w rozwój metod badania właściwości dynamicznych dysz przeznaczonych do płynowego sterowania wektorem ciągu, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wiktora HOFFMANNA.

Uzasadnieniem powyższego wniosku jest przede wszystkim kompleksowy charakter przeprowadzonych badań, obejmujących powiązanie analiz teoretycznych i numerycznych z opracowaniem specjalistycznego stanowiska eksperymentalnego oraz autorskiej procedury identyfikacji parametrów dynamicznych. Szczególne znaczenie ma uzyskanie danych doświadczalnych dotyczących odpowiedzi przejściowej dyszy DTN, stanowiących wartościowe uzupełnienie dotychczasowego dorobku naukowego w tym obszarze.

W ocenie recenzenta na wyróżnienie zasługuje również umiejętność samodzielnego rozwiązania złożonych problemów metodycznych związanych z prowadzeniem pomiarów w warunkach krótkotrwałego, niestacjonarnego przepływu gazu. Opracowana metodyka oraz uzyskane wyniki tworzą podstawy do dalszych badań nad charakterystykami dynamicznymi układów wektorowania ciągu i mogą znaleźć zastosowanie w doskonaleniu metod ich projektowania oraz analizy.

Przedstawione osiągnięcia, rozpatrywane łącznie z poziomem naukowym rozprawy i stopniem złożoności zrealizowanych badań eksperymentalnych, uzasadniają w mojej ocenie wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

Andrzej Żyluk

Elektronicznie podpisany przez Andrzej Żyluk
Data: 2026.11.04 13:08:06 +01'00'