

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Uhl  
Katedra Robotyki i Mechatroniki  
Akademia Górniczo – Hutnicza  
Al. Mickiewicza 30  
30-059 Kraków

Kraków 25. 02 .2025

## **Opinia o pracy doktorskiej pt. “Projekt, badanie oraz rozwój ekologicznego silnika raketowego zasilanego wysoko stężonym nadtlaniem wodoru do satelitarnego modułu napędowego POLON” autorstwa mgr inż. Adrian Parzybut**

### **1. Zagadnienie naukowe rozważone w rozprawie**

W pracy doktorskiej Autor podjął problem opracowania i badania eksperymentalnego oraz rozwój silnika raketowego o ciągu 1N, zasilanego 98% nadtlaniem wodoru, przeznaczonego dla modułu napędowego projektu POLON.

Silniki do satelitów są coraz bardziej poszukiwanym produktem zwiększającym żywotność satelitów i zwiększającym ich funkcjonalność i ze względu na coraz większą liczbę umieszczanych na orbicie satelitów będzie ich eksploatowanych coraz więcej. Z drugiej strony należy zauważyć, że współcześnie rosną wymagania co do ekologii materiałów pędnych, co wynika z nowych strategii dążenia do zrównoważonego kosmosu przyjętych przez największe agencje kosmiczne na świecie. Materiały pędne silników raketowych stosowanych obecnie są silnie toksyczne i zagrażające środowisku. Opracowywany i testowany jednopaliwowy silnik raketowy na paliwo ciekłe oparty na nadtlaniu wodoru spełnia restrykcyjne wymagania środowiskowe. Z tego powodu podjęcie tematu pracy doktorskiej w tym obszarze jest ważne i nowoczesne. W oparciu o przegląd konstrukcji napędów raketowych Autor wybrał do dalszych rozważań silnik chemiczny na paliwo płynne z jednoskładnikowym materiałem pędym. Wybór tego silnika, moim zdaniem jest wykonany arbitralnie bez głębokiego dowodu merytorycznego. Nawet na podstawie informacji zawartych w pracy można sądzić, że silnik elektryczny jest równie ekologiczny i w tym kierunku w ostatnim okresie prowadzone są intensywne prace rozwojowe i wdrożeniowe (np. silniki satelitów StarLink V2 są silnikami elektrycznymi). Jednym z kryteriów wyboru silnika jakie podał Autor jest osiągnięcie TRL8 (str 32), choć studiując wnioski i kierunki dalszych badań taki poziom zostanie osiągnięty po zrealizowaniu szeregu kolejnych badań (str 199). Jak podaje Autor na stronie 192, dla opracowanej konstrukcji osiągnięto poziom TRL 7.

W pracy Autor przedstawił podstawy teoretyczne funkcjonowania silników chemicznych, ich podstawowe cechy konstrukcyjne, procedurę projektowania i badania elementów obiektów kosmicznych, choć brak jest odniesienia do ważnych i stosowanych w sektorze kosmicznym standardów ECSS.

Zadaniem badawczym, które Autor zdefiniował i rozwiązał w ramach pracy jest badanie silnika raketowego chemicznego na paliwo płynne i modyfikacja jego konstrukcji w celu osiągnięcia zdefiniowanych wartości parametrów charakterystycznych silnika spełniających wymagania określonej misji kosmicznej.

Zagadnienie badawcze, które jest przedmiotem pracy jest bardzo istotne z punktu widzenia rozwoju technologii silników raketowych na paliwo płynne jednoskładnikowe, ponieważ jego zrealizowanie prowadzi do poprawy parametrów silnika związanych ze spełnieniem rygorystycznych wymagań środowiskowych.

## **2. Cel pracy i teza naukowa**

W rozdziale zatytułowanym „Cel i teza pracy” Autor przedstawił postawioną tezę i cel pracy.

Teza jest sformułowana jako; „Silnik raketowy na jednoskładnikowy materiał pędny zasilany wysoko stężonym nadtlakiem wodoru może stanowić efektywną i ekonomiczną alternatywę dla obecnie stosowanych silników raketowych zasilanych toksycznymi materiałami pędnymi zapewniając porównywalne osiągi przy jednoczesnym zmniejszeniu negatywnego wpływu na środowisko”.

Teza jest sformułowana prawidłowo, a treść pracy jest podporządkowana jej udowodnieniu, przynajmniej w aspekcie technicznym. Nie znalazłem w pracy żadnych rozważań w aspekcie ekonomicznym, który jest wymieniony w tezie i z punktu widzenia wdrożenia opisanego na stronie 192 i 193 jest niezmiernie ważny.

Cel pracy Autor podał w formie celu głównego oraz celi szczegółowych, których osiągnięcie prowadzi do osiągnięcia celu głównego. Cel główny jest sformułował w sposób następujący:

„Głównym celem rozprawy doktorskiej jest opracowanie, badania doświadczalne oraz rozwój silnika raketowego zasilanego 98% nadtlakiem wodoru do zastosowań satelitarnych zgodnie z wymaganiami modułu napędowego POLON”

Cele szczegółowe pokrywają się z zakresem pracy i obejmują; etapy projektowania, badania eksperymentalne, analizę i optymalizację parametrów silnika, przeprowadzenie kwalifikacji komponentów silnika do pracy w środowisku zbliżonym do kosmicznego, przeprowadzenie standardowych dla napędów testów kwalifikacyjnych na wstrząsarce i komorze próżniowej, opracowanie pełnej dokumentacji technicznej procesu projektowania, testowania i kwalifikacji silnika oraz walidacji technologii w kontekście rozwoju konstrukcji i zastosowań.

Powyższy cel jest zagadnieniem badawczym ponieważ definiuje obszar badań oraz metody zastosowane do rozwiązania postawionego problemu.

Choć moim zdaniem realizacja pracy jest zawężona w stosunku do powyżej zadeklarowanego w szczególności w zakresie dokumentacji (ostatniego z deklarowanych celi szczegółowych), o której nie znalazłem żadnych wzmianek w treści pracy.

Cała treść pracy jest podporządkowana realizacji celu pracy. Cel pracy został osiągnięty, przynajmniej częściowo, bo Autor na podstawie zrealizowanego procesu badawczego osiągnął większość zdefiniowanych celów szczegółowych oraz pokazał na bazie eksperymentów przydatność opracowanej konstrukcji dla celów misji satelitarnych oraz spełnienie wymagań modułu POLON. Praca jest interdyscyplinarna i ma bardzo szeroki zakres.

### **3. Ważność i aktualność zagadnienia naukowego rozpatrywanego w pracy**

Praca dotyczy istotnego, z punktu widzenia praktycznego i naukowego, procesu projektowania i badania chemicznego silnika raketowego przeznaczonego do napędu satelitów. Jak wynika z przeglądu literatury zawartego w pracy, tego typu konstrukcje są obecnie powszechnie stosowane i intensywnie rozwijane w szczególności w kierunku spełnienia ograniczeń środowiskowych przy jednoczesnym podwyższeniu parametrów funkcjonalnych satelity. Wybór paliwa oraz dostosowanie konstrukcji do stosowanego paliwa jest wyzwaniem naukowym rozważanym w ramach pracy. Prezentowana praca zawiera szczegółowe i kompletne opisy zastosowanych metod badawczych do badania eksperymentalnego parametrów silnika oraz kwalifikacji jego komponentów do stosowania w aplikacjach kosmicznych. Autor testuje różne rozwiązania a formułowane na ich podstawie wnioski wykorzystuje do modyfikacji konstrukcji silnika. Takie podejście jest klasyczne, co oznacza, że zastosowano bardzo klasyczny sposób opracowania konstrukcji, dla tego typu obiektów z zastosowaniem klasycznych podejść zarówno w zakresie projektowania i badania eksperymentalnego. Jest ono bardzo wartościowe i ważne, ponieważ opiera się na wynikach eksperymentów co w dobie wszechobecnej symulacji i wykorzystania wnioskowania na podstawie modeli jest podejściem wyróżniającym tą pracę wśród prac dotyczących rozważanego zagadnienia.

Podsumowując ten aspekt oceny rozprawy należy stwierdzić, że praca dotyczy bardzo aktualnego problemu badawczego jakim jest opracowywanie i wdrażanie nowych bardziej ekologicznych konstrukcji silników raketowych do napędu satelitów. Zagadnienia te są bardzo ważne, a poziom opisów zastosowanych metod oraz osiągniętych wyników jest na tyle szczegółowy, że pracę można uznać za ważną z punktu widzenia naukowego.

### **4. Naukowość i oryginalność pracy**

Zaproponowana przez Autora metodologia badawcza opiera się na klasycznym podejściu do rozwiązywania interdyscyplinarnych problemów projektowania i

wdrażania nowych konstrukcji do zastosowań kosmicznych. Większość stosowanych metod badawczych zarówno w zakresie projektowania, jak i badania konstrukcji silnika ma charakter naukowy i jest powszechnie stosowany w pracach związanych z opracowywaniem nowych konstrukcji dla sektora kosmicznego. Opisy zastosowanych metod są szczegółowe, a zalety i wady tych metod są przedyskutowane, na tyle szczegółowo, że czytający może wnioskować o ich poprawnym zastosowaniu. W zakresie projektowania należy tutaj wspomnieć o metodach numerycznej analizy przepływów oraz analiz termicznych konstrukcji silnika, które z punktu widzenia zastosowania w kosmosie są kluczowe. W zakresie badania eksperymentalnego prototypowych rozwiązań konstrukcji silnika, Autor zmodyfikował i wdrożył unikalne metody badań zarówno procesów zachodzących podczas pracy konstrukcji, jak również parametrów samej konstrukcji w zakresie wytrzymałościowym, termicznym, przepływowym i innym decydującym o funkcjonalności silnika i wpływających na ocenę możliwości jego zastosowania w kosmosie.

Z punktu widzenia naukowości, pracę oceniam raczej pozytywnie, wprowadzie mało jest w niej treści naukowych, w większości praca ma charakter badawczo - wdrożeniowy. Dominują badania porównawcze znanych metod dla konkretnego i według mnie trudnego do realizacji zastosowania.

Praca jest zakończona oceną gotowości technologicznej wdrożonego prototypu , która Autor ocenia na TRL7 oraz przedstawieniem programu kolejnych badań, które mogą doprowadzić do opracowania finalnej wersji silnika i zastosowanie go w realnym satelicie.

Podsumowując merytoryczną ocenę, naukowości i aktualności tematyki rozprawy doktorskiej uważam, że praca jest realizowana w aktualnej tematyce badań nad nowymi konstrukcjami silników raketowych do napędu satelitów spełniającymi wymagania środowiskowe. Podjęcie tak złożonego i interdyscyplinarnego tematu rozprawy oceniam pozytywnie. Naukowość pracy oceniam raczej pozytywnie, spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim.

Tematykę pracy można zaliczyć do dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

## **5. Mocne i słabe strony pracy**

Mocne strony pracy to:

- Pokazanie całego i kompletnego cyklu opracowywania konstrukcji dedykowanych do zastosowań kosmicznych
- Ukierunkowanie pracy na wdrożenie nowej konstrukcji silnika raketowego dedykowanego do napędu satelitów w realnym projekcie satelity
- Opracowanie i zrealizowania szerokiego planu badan eksperymentalnych konstrukcji silnika raketowego dla satelitów umożliwiającą kwalifikację zarówno komponentów jak i całej konstrukcji do zastosowań kosmicznych

- Zwrócenie uwagi i uwzględnienie czynnika środowiskowego w opracowaniu konstrukcji dla zastosowań kosmicznych
- Zaprojektowanie, zbudowanie oraz uruchomienie stanowisk badawczych dedykowanych do badania micro silników raketowych dedykowanych do zastosowań dla satelitów
- Sformułowanie wniosków na podstawie przeprowadzonych badań, które bezpośrednio wykorzystano do modyfikacji konstrukcji
- Opracowanie modyfikacji procesów, nie tylko parametrów konstrukcyjnych dla poprawy parametrów ruchowych mikro silnika raketowego, na przykład dotyczy to doboru sekwencji zimnych uruchomień,
- Bardzo szczegółowa analiza doboru komponentów micro silnika raketowego

Słabe strony pracy to:

- Cel pracy jest sprecyzowany jasno i jednoznacznie, natomiast brak jest w pracy analizy zadeklarowanego aspektu ekonomicznego opracowanej konstrukcji. Autor zupełnie nie analizuje ani nie podaje w pracy wyników oceny ekonomicznej rozwiązania.
- Na stronie 32 pracy Autor deklaruje, że analizuje jedynie konstrukcje, które osiągnęły poziom gotowości technologicznej TRL8, jednak w konkluzjach podaje, że jego konstrukcja osiągnęła gotowość technologiczną na poziomie TRL7. Wymaga wyjaśnienia dlaczego nie uwzględniono w analizie dostępnych konstrukcji na poziomie TRL7, które mogłyby być bezpośrednio referencyjnymi dla uzyskanego rozwiązania.
- W moim odczuciu wybór optymalnego napędu jako napędu chemicznego na jednoskładnikowy materiał pędny w postaci nadtlenu wodoru, jest zrealizowany dość arbitralnie. Nie uwzględniono w dyskusji wyboru rozwiązania napędów elektrycznych, które są już praktycznie wdrażane w najnowszych satelitach, a według zdefiniowanych i przyjętych przez Autora kryteriach wyboru mogłyby być z powodzeniem zastosowane w rozważanym rozwiązaniu.
- Brak jest w pracy analizy (a przynajmniej odniesienia się do) wpływu promieniowania kosmicznego na zastosowany materiał pędny, które to może mieć znaczący wpływ na działanie silnika w długoterminowych misjach kosmicznych
- W przedstawieniu celu i zakresu pracy Autor pominął etap wytwarzania prototypu, który przy dynamicznie zmieniającej się technologii np. rozwój przyrostowych technik wytwarzania jest bardzo istotny, w szczególności, gdy wynik projektu ma być wdrożony. Niemniej w pracy Autor zamieścił krótki rozdział dotyczący stosowanych technologii wytwarzania zastosowanych do zbudowania prototypu. Jednak, jeśli praca ma kończyć się wdrożeniem to problematyka wytwarzania prototypu powinna być potraktowana z większą starannością.
- W rozdziale 2 w podanych celach szczegółowych zauważyłem deklaracje o wykonaniu dokumentacji technicznej zarówno stosowanych procesów projektowania i badania jak i badania i kwalifikacji. Jest to niezmiernie ważny składnik wdrażania obiektów

kosmicznych do praktyki. Natomiast w treści pracy nie znalazłem żadnych treści dotyczących dokumentacji, jej formy i zastosowanych standardów, które dla sektora kosmicznego są ściśle zdefiniowane i rygorystycznie stosowane.

- Bardzo istotną częścią pracy jest kwalifikacja poszczególnych elementów, jak i całego rozwiązania dla zastosowań kosmicznych, w tym kierunku przeprowadzone zostały szczegółowe badania, brak jest natomiast w pracy podania szczegółowych kryteriów kwalifikacji, a w przypadku ich braku, opisu jak zrealizowano kwalifikację
- Opisy zastosowanych systemów pomiarowych do realizacji podstawowych pomiarów zostały bardzo skrócone lub pominięte. Parametry tych systemów są kluczowe w ocenie poprawności otrzymanych wyników, chodzi tu na przykład o dynamikę układów pomiarowych, częstości próbkowania sygnałów, itp.
- Jednym z kluczowych elementów opracowywanego silnika jest katalizator, pominięto w pracy opis technologii jego wykonania, która ma zasadniczy wpływ na możliwość wdrożenia (str. 164)
- Na stronie 175 opisano wyniki testu maksymalnie długiego uruchomienia i podsumowano je stwierdzeniem, że nie zaobserwowano widocznych zmian w temperaturze powierzchni silnika co świadczy o braku degradacji. Stwierdzenie to wymaga doprecyzowania, dlaczego brak zmian temperatury na powierzchni świadczy o braku degradacji.
- Badano parametry silnika przy obniżonym ciśnieniu, co ma istotne znaczenie dla jego zastosowań kosmicznych, natomiast brak jest testów w obniżonej temperaturze, które to występuje w warunkach orbitalnych.

## 6. Wniosek końcowy

Praca doktorska przedstawiona przez mgr inż. Adrian Parzybut, jej zawartość i forma wskazują na Jego wysoką wiedzę inżynierską w zakresie opracowania i badania konstrukcji chemicznego silnika raketowego na paliwo płynne. Sposób realizacji pracy wskazuje na umiejętność Kandydata w posługiwaniu się narzędziami pracy współczesnego badacza, w szczególności w zakresie rozwiązywania problemów inżynierskich. Wszystkie wymienione wyżej zagadnienia rozważane w pracy można zaliczyć do dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Podsumowując, uważam, że Autor w przedłożonej rozprawie poprawnie sformułował zadanie badawcze, jakim jest opracowanie i badanie silnika raketowego opartego na ekologicznym materiale pędnym w postaci 98% nadtlenu wodoru oraz kwalifikacja jego komponentów do pracy w warunkach kosmicznych.

Praca odpowiada warunkom stawianym, w Ustawie o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych, rozprawom doktorskim w zakresie nauk technicznych. **Wobec powyższego stawiam wniosek o dopuszczenie przedłożonej, przez mgr inż. Adrian Parzybut, rozprawy do publicznej obrony.**

