

Warszawa, dn. 02.02.2026 r.

Dr hab. inż. Paweł Baranowski, prof. WAT
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Wojskowa Akademia Techniczna
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2
00-908 Warszawa
Tel.: +48 261 837 275
E-mail: pawel.baranowski@wat.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej

„Badania nad identyfikacją parametrów lotu rakiety poprzez pomiary pola ciśnienia na korpusie w czasie rzeczywistym”

autorstwa mgr. inż. MACIEJA CICHOCKIEGO

1. Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej **DR. HAB. INŻ. MARKA WOJTYRY** oraz dołączona do niej rozprawa doktorska, pt. *„Badania nad identyfikacją parametrów lotu rakiety poprzez pomiary pola ciśnienia na korpusie w czasie rzeczywistym”* autorstwa **MGR. INŻ. MACIEJA CICHOCKIEGO**. Promotorem rozprawy jest **DR HAB. INŻ. JAN KINDRACKI, prof. uczelni**, natomiast promotorem pomocniczym **DR INŻ. DARIUSZ SOKOŁOWSKI**.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy i kandydata

Recenzowana rozprawa została napisana w języku polskim i ujęta na 132 stronach tekstu zasadniczego wraz z rysunkami, tabelami oraz wykazem literatury. Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje **sześć zasadniczych rozdziałów**, poprzedzonych streszczeniem oraz uzupełnionych o literaturę. Wykaz literatury obejmuje 96 pozycji bezpośrednio związanych z tematyką aerodynamiki, techniki rakietowej, systemów pomiarowych oraz metod numerycznych i eksperymentalnych wykorzystywanych w pracy. Poszczególne rozdziały zatytułowano następująco:

Rozdział 1: *Motywacja i kontekst pracy*

Rozdział 2: *Przegląd literatury*

Rozdział 3: *Teza pracy i główne cele*

Rozdział 4: *Metody badań*

Rozdział 5: *Uzyskane rezultaty*

Rozdział 6: *Wnioski i podsumowanie*

W **pierwszym rozdziale** Autor przedstawia motywację podjęcia tematu badawczego oraz kontekst prowadzonych prac na tle aktualnych rozwiązań stosowanych w technice raketowej. Wskazuje na istotne ograniczenia klasycznych systemów pomiarowych wykorzystywanych do identyfikacji parametrów lotu w obiektach poruszających się w szerokim zakresie prędkości i kątów orientacji. Rozdział ten zawiera również zarys problemu badawczego oraz krótkie omówienie struktury dalszej części rozprawy.

Rozdział drugi stanowi rozbudowany przegląd literatury i aktualnego stanu wiedzy. Autor omawia w nim rozwój techniki raketowej, zagadnienia związane ze sterowaniem rakietami w atmosferze, znaczenie kąta natarcia i kąta ślizgu w kontekście manewrowości obiektu latającego, a także dostępne metody pomiaru parametrów orientacji przestrzennej stosowane w lotnictwie. Szczególną uwagę poświęcono systemom typu *Flush Air Data System* (FADS), które stanowią główny przedmiot badań własnych w dalszej części rozprawy. Przegląd literatury pozwala jasno zidentyfikować lukę badawczą, polegającą na ograniczonym zastosowaniu systemów FADS w technice raketowej.

W **rozdziale trzecim** Autor formułuje tezę rozprawy oraz precyzuje cel główny i cele szczegółowe pracy. Teza została sformułowana w sposób jednoznaczny i odnosi się do możliwości identyfikacji kluczowych parametrów lotu rakiety na podstawie pomiarów rozkładu ciśnienia na jej korpusie w czasie rzeczywistym, przy zachowaniu praktycznej wykonalności systemu.

Rozdział czwarty poświęcony jest metodyce badań. Autor szczegółowo omawia zastosowane narzędzia numeryczne w postaci analiz CFD (ang. *Computational Fluid Dynamics*), opisuje proces przygotowania siatki obliczeniowej, dobór modeli turbulencji oraz parametry obliczeń. Następnie przedstawiono metodykę badań w tunelu aerodynamicznym, obejmującą opis stanowiska badawczego, modelu do badań oraz zastosowanego układu pomiarowego. W dalszej części rozdziału Autor opisuje konstrukcję i zasadę działania opracowanego układu pomiarowego oraz algorytmy przetwarzania danych.

W **piątym rozdziale** zaprezentowano uzyskane wyniki badań. Autor przedstawia rezultaty analiz numerycznych dla przepływów poddźwiękowych i naddźwiękowych, wyniki badań tunelowych oraz proces kalibracji modelu aerodynamicznego. Istotną częścią tego rozdziału jest omówienie wyników symulacji działania systemu w warunkach rzeczywistego lotu rakiety, wraz z porównaniem danych pomiarowych z wynikami symulacji numerycznych. Przedstawiona analiza wskazuje na wysoką zgodność uzyskanych wyników.

Rozdział szósty zawiera wnioski końcowe i podsumowanie pracy. Autor syntetyzuje uzyskane rezultaty, odnosi się do postawionej tezy oraz wskazuje możliwe kierunki dalszego rozwoju opracowanego systemu, w tym jego potencjalne zastosowania w przyszłych konstrukcjach raketowych.

MGR INŻ. MACIEJ CICHOCKI jest współautorem łącznie 5 prac zarejestrowanych w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej opublikowanych w czasopiśmie oraz materiałach konferencyjnych. Z tej listy publikacji 2 prace są zarejestrowane w bazie SCOPUS na dzień pisania recenzji. Dane naukometryczne Pana mgr. inż. Macieja Cichockiego to 0 cytowań z łącznym indeksem Hirscha równym 0 na dzień powstania recenzji (wg bazy SCOPUS). Pomimo braku cytowań Doktoranta, jego dorobek publikacyjny w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez stosowną ustawę.

3. Szczegółowa charakterystyka rozprawy

3.1 Ocena układu i struktury rozprawy

Rozprawa została opracowana w sposób logiczny i spójny. Układ pracy odpowiada klasycznemu schematowi rozprawy doktorskiej o charakterze inżyniersko-badawczym i obejmuje: wprowadzenie motywacyjne, przegląd literatury, sformułowanie tezy i celów pracy, szczegółowy opis zastosowanych metod badawczych, obszerny rozdział prezentujący wyniki oraz końcowe wnioski. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że struktura pracy odzwierciedla rzeczywisty tok badań: od analizy problemu i ograniczeń istniejących rozwiązań, przez modelowanie numeryczne i badania tunelowe, aż po walidację systemu w warunkach rzeczywistego lotu rakiety. Taki układ znacząco ułatwia śledzenie rozumowania Autora i ocenę zasadności podejmowanych decyzji projektowych.

3.2 Ocena przeglądu literatury

Przegląd literatury został opracowany rzetelnie i obejmuje zarówno klasyczne pozycje z zakresu aerodynamiki i techniki raketowej, jak i współczesne publikacje dotyczące systemów FADS, czujników ciśnienia oraz metod estymacji parametrów lotu. Autor poprawnie identyfikuje fakt, że rozwiązania typu FADS są szeroko stosowane w lotnictwie, natomiast ich implementacja w technice raketowej jest ograniczona ze względu na ekstremalne warunki pracy, duże przeciążenia oraz szeroki zakres prędkości i kątów natarcia. Na uwagę zasługuje umiejętność krytycznego odniesienia się do istniejących rozwiązań. Autor nie ogranicza się do referowania stanu wiedzy, lecz wskazuje konkretne bariery technologiczne i metrologiczne, które uzasadniają podjęcie badań własnych.

Pewnym mankamentem przeglądu literatury jest stosunkowo ograniczone odniesienie do najnowszych prac z obszaru algorytmów estymacji opartych o metody probabilistyczne (np. filtry Kalmana wyższych rzędów czy metody uczenia maszynowego), które mogłyby stanowić interesujące tło porównawcze dla zaproponowanego algorytmu.

3.3 Ocena celu pracy i jego realizacji

Cel główny rozprawy został sformułowany jasno i jednoznacznie. Autor stawia sobie za zadanie ocenę możliwości identyfikacji parametrów lotu rakiety w czasie rzeczywistym na podstawie pomiarów ciśnienia na jej korpusie, przy założeniu praktycznej wykonalności systemu oraz jego przydatności do zastosowań operacyjnych.

Cele szczegółowe, obejmujące, m.in. opracowanie układu pomiarowego, budowę bazy danych pól ciśnienia, kalibrację algorytmu oraz walidację w locie, są spójne z celem głównym i zostały w pracy zrealizowane. W ocenie Recenzenta cel pracy został osiągnięty.

3.4 Ocena metod badawczych

Autor zastosował szeroki i właściwie dobrany zestaw metod badawczych. W pracy wykorzystano zaawansowane symulacje CFD dla przepływów poddźwiękowych i naddźwiękowych, badania w tunelu aerodynamicznym, a także rzeczywiste próby w locie rakiety. Uzupełnieniem części eksperymentalnej jest opracowanie dedykowanego algorytmu przetwarzania danych pomiarowych. Zastosowanie tak kompleksowego podejścia należy

uznać za jedną z głównych zalet rozprawy. Szczególnie istotna jest walidacja wyników numerycznych i tunelowych poprzez dane z rzeczywistego lotu, co znacząco podnosi wiarygodność uzyskanych rezultatów.

Z drugiej strony, w pracy można odczuć niedosyt w zakresie opisu modelu obliczeniowego CFD oraz zakresu przedstawionych wyników, co zostało szerzej ujęte w punkcie 4 niniejszej Recenzji.

3.5 Ocena wyników i ich interpretacji

Uzyskane wyniki zostały przedstawione w sposób czytelny i poparte odpowiednimi ilustracjami oraz zestawieniami liczbowymi. Autor wykazuje się umiejętnością krytycznej interpretacji rezultatów, wskazując zarówno ich mocne strony, jak i ograniczenia. Osiągnięte wartości błędów średniokwadratowych dla kąta natarcia i kąta ślizgu należy uznać za bardzo dobre w kontekście zastosowań rakietowych. Wyniki te potwierdzają skuteczność zaproponowanego podejścia.

Pewnym ograniczeniem pozostaje jednak fakt, że pełna walidacja w locie dotyczy głównie reżimu poddźwiękowego. Choć Autor słusznie wskazuje na bariery techniczne i organizacyjne oraz problemy podczas testu, brak danych z rzeczywistego lotu naddźwiękowego ogranicza możliwość pełnej oceny uniwersalności systemu.

3.6 Ocena praktycznego znaczenia pracy

Rozprawa ma wyraźny charakter aplikacyjny. Opracowany system może znaleźć zastosowanie w nowoczesnych rakietowych układach sterowania, systemach rekonstrukcji toru lotu oraz rozwiązaniach wspomagających autonomiczną nawigację. Praca wpisuje się w nurt badań o potencjale wdrożeniowym, co jest jej istotnym atutem recenzowanej rozprawy.

4. Pytania merytoryczne, kwestie do dyskusji oraz uwagi

Poza wcześniej wskazanymi drobnymi niedociągnięciami, Recenzent zwraca uwagę na następujące kwestie, które wpływają na odbiór oraz jakość naukową recenzowanej rozprawy. Poniższe uwagi dotyczą w głównej mierze części rozprawy dotyczącej badań modelowych, które w porównaniu z bardzo dobrze opracowanymi rozdziałami dotyczącymi badań eksperymentalnych i analiz wyników, wypadają słabiej i nieco zaniżają ogólnie pozytywny odbiór rozprawy przez czytającego.

1. W recenzowanej pracy miejscami zauważalny jest **styl narracji inspirowany składnią języka angielskiego**, zbliżony dla bezpośredniego tłumaczenia procedur obliczeniowych. Szczególnie jest to widoczne w rozdziale dotyczącym analiz numerycznych CFD. Przejawia się on, m.in. w nadmiernym stosowaniu strony biernej, konstrukcji typu „skorzystano z...”. W konsekwencji duża część zdań ma złą składnię i brzmi nienaturalnie, a momentami jest wręcz ciężko zrozumieć co Autor miał na myśli. Przykładami tego typu zdań są, m.in.:

- „Celem obliczeń jest uzyskanie informacji o rozkładzie ciśnień na korpusie modelu pocisku rakietowego, ocena przydatności i efektywności infrastruktury HPC w obliczeniach aerodynamiki rakiet”;

- „Czas oszczędzony na generacji siatki skompensuje nieoptymalny dobór rozmiaru elementów warstwy przyściennej dla kolejnych przypadków obliczeniowych i potencjalną oszczędność na czasie obliczeń w przypadku zastosowania większych wysokości elementów w warstwie przyściennej”
- „(...) aby rozwiązać przepływ w podwarstwie lepkiej (laminarnej) przepływu”.
- „Liniowa skalowalność obliczeń jest bardzo szybko tracona, więc z punktu widzenia optymalizacji zużycia zasobów racjonalne jest wykorzystywanie minimum możliwych do zakolejkowania węzłów obliczeniowych, a w zamian zwiększanie liczby kolejek”.
- „Z wykorzystaniem funkcji XY-Plot zapisano przebiegi ciśnienia na wyznaczonych krzywych, otrzymano wartości współczynnika ciśnieniowego, które z użyciem mogą być rozważane bezwymiarowo”.

Niektóre z opisów są zbyt kolokwialne i brzmią nieprofesjonalnie, np. „Podjęty problem ma burzliwy charakter i występują problemy ze stabilnością obliczeń na początku procesu iterowania”. Takich zdań jest znacznie więcej i choć nie wpływają one bezpośrednio na poprawność merytoryczną opisu metod obliczeniowych, to obniżają naturalność i płynność narracji w języku polskim. Korekta stylistyczna polegająca na uproszczeniu składni, ograniczeniu strony biernej oraz lepszym dostosowaniu terminologii do polskich standardów języka technicznego poprawiłaby czytelność tej części rozprawy.

2. **Autor miejscami nie zachowuje konsekwencji czasowej** przy omawianiu metodologii badań lub opracowanych modeli, stosując naprzemiennie czas teraźniejszy i przeszły (np. str. 38, 39, 43). Jednym z reprezentatywnych przykładów jest zdanie na stronie 43:

- „Wlot do domeny został zrealizowany z użyciem warunku brzegowego typu *pressure-far-field*. Intensywność turbulencji w przepływie swobodnym wynosi 0,5% [70]. Skala turbulencji wynosi 1% średnicy pocisku. Wylot zrealizowano za pomocą warunku *pressure-outlet*”.

Wymieszanie dwóch czasów przy opisywaniu danego etapu badań obniża spójność narracji i może powodować wrażenie braku jednolitej konwencji językowej.

3. Doktorant opisując model obliczeniowy **zastosował ogólne charakterystyki**, np. liczby elementów tworzących model dyskretny. Skoro Autor samodzielnie utworzył model służący do przeprowadzenia analiz CFD, zastanawiające jest pisanie „około 6 milionów elementów”.
4. **Domena przepływu została opisana jedynie szczątkowo**, a Autor nie podaje jej wymiarów ani jednoznacznego uzasadnienia przyjętego zakresu obliczeniowego, co utrudnia ocenę wpływu warunków brzegowych na uzyskane wyniki. Choć w pracy przywołano wartości parametru y^+ , brak jest informacji o rzeczywistej wielkości pierwszej warstwy przyściennej, współczynnika wzrostu siatki oraz sposobie konstrukcji siatki w obszarach o dużych gradientach wielkości przepływowych. Dodatkowo, w opisie modelu pojawia się nieprecyzyjne użycie pojęcia „elementów”, podczas gdy w kontekście mechaniki płynów i metod CFD zasadnym jest posługiwanie się pojęciem objętości skończonych.
5. Istotnym brakiem metodycznym jest **nieprzeprowadzenie analizy wrażliwości wielkości objętości (siatki) obliczeniowej**, pozwalającej ocenić wpływ liczby objętości skończonych na stabilność i dokładność uzyskiwanych wyników. Brak takiej analizy utrudnia jednoznaczną ocenę wiarygodności prezentowanych rezultatów.

6. Recenzent zwraca również uwagę na **przyjęte kryterium zbieżności** na poziomie rzędu 10^{-3} , które należy uznać za relatywnie mało restrykcyjne. W pracy brak jest dyskusji, czy osiągnięta zbieżność numeryczna przekłada się na zbieżność fizyczną analizowanych wielkości oraz przy jakiej liczbie iteracji uzyskano ostateczne i zbieżne wyniki.
7. Ponadto, **prezentacja wyników CFD ogranicza się głównie do danych punktowych lub uśrednionych, bez szerszego zobrazowania struktury przepływu**. Doktorant przedstawił mapę rozkładu ciśnienia na Rys. 20, jednak brakuje np. map pól wektorów prędkości w objętości domeny czy rozkładów ciśnienia na powierzchniach ścian. Pozwoliłoby to lepiej zilustrować charakter opływu geometrii rakiety i ułatwiłoby jakościową ocenę poprawności uzyskanych wyników. Pomimo, że nie jest to najbardziej istotne w pracach naukowych, to przedstawienie graficzne tego typu wyników poddaje również aspekt wizualny rozprawy.

Recenzent zwraca uwagę na dość sporą liczbę błędów natury edycyjnej, językowej i stylistycznej. Z uwagi na ich liczebność, wskazanym byłoby poddać rozprawę profesjonalnej ocenie korektorskiej i językowej. Wybrane błędy najbardziej wpływające na ogólny odbiór pracy wymieniono poniżej:

1. **Błędy interpunkcyjne w odwołaniach do rysunków** – w tekście pojawia się kropka po numerze rysunku, a następnie przecinek, co jest formalnie niepoprawne (np. „ (...) pokazano je na Rys. 16., gdzie...” lub „ (...) na Rys. 44. i Rys. 45., które...”)
2. **Numeracja grafik oraz tabel** powinna zawierać numer rozdziału oraz numer grafiki/tabeli z tego rozdziału. W ten sposób Autor ułatwiłby czytelnikowi interpretację wyników oraz odniesienie wyników do wykresów i grafik znajdujących się w innych rozdziałach.
3. W całej rozprawie występuje **brak numeracji równań**.
4. Stosowanie **kolokwializmów**, np. „benchmarki” na str. 44.
5. **Wtrącenia terminologii angielskiej** bez jednoznacznego ugruntowania polskim odpowiednikiem – przykładowo pojawia się termin „booster” (oraz skróty typu INS) w opisie konstrukcji, bez konsekwentnego równoległego stosowania polskiej wersji (np. „przyspieszacz/booster”). Wprawdzie jest to spotykane w pracach technicznych, ale w doktoracie lepiej przyjąć zasadę: wzmianka pierwszy raz „polski termin (angielski odpowiednik)”, a dalej już konsekwentnie trzymać się jednej formy.
6. Doktorant stosuje **niekonsekwencje w przypadku nazw i skrótów anglojęzycznych**. W niektórych przypadkach występuje rozszerzenie nazwy skrótu, a w niektórych już nie, np. inercyjna jednostka pomiarowa (IMU), Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA), Linia celowania (ang. *line of sight* – LOS), itp.
7. Kilkakrotnie w recenzowanej pracy **błędnie użyto słowa „ilość”**, które stosuje się do rzeczy niepoliczalnych, natomiast dla większości przypadków omawianych przez Autora powinno się stosować słowo „liczba”. Przykładami są: „ilość uruchomień silników sterujących” (str. 14), „ilość elementów siatki” (str. 39).
8. Niektóre grafiki nie są przygotowane z **należyłą starannością i mają niską jakość**, np. Rys. 33-37.

5. Ocena oryginalnych elementów pracy

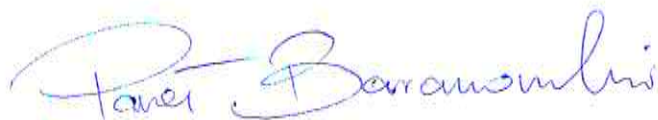
Po zapoznaniu się z treścią rozprawy, Recenzent pragnie wskazać następujące elementy pracy, które w sposób jednoznaczny świadczą o jej wartości merytorycznej, poznawczej oraz aplikacyjnej:

1. Jednym z najistotniejszych atutów rozprawy jest **podjęcie aktualnego i praktycznie istotnego problemu badawczego**, związanego z identyfikacją parametrów lotu rakiety w warunkach rzeczywistych. Tematyka pracy wpisuje się bezpośrednio w potrzeby nowoczesnych systemów sterowania i nawigacji obiektów raketowych, a zaproponowane rozwiązanie ma wyraźny potencjał wdrożeniowy.
2. Na szczególne podkreślenie zasługuje **kompleksowy charakter przeprowadzonych badań**, obejmujących pełną ścieżkę badawczą: od analizy literaturowej, przez modelowanie numeryczne CFD, badania tunelowe, aż po walidację systemu w rzeczywistym locie rakiety. Tak szerokie i spójne podejście badawcze znacząco podnosi wiarygodność uzyskanych wyników.
3. Bardzo mocną stroną pracy jest **opracowanie i implementacja rzeczywistego układu pomiarowego**, a następnie jego przetestowanie w warunkach operacyjnych. Rzeczywista weryfikacja rozwiązania w locie świadczy o wysokim poziomie dojrzałości technologicznej prezentowanych badań.
4. Istotnym walorem rozprawy jest **umiejętne połączenie metod numerycznych i eksperymentalnych**. Autor nie traktuje symulacji CFD jako celu samego w sobie, lecz wykorzystuje je jako narzędzie do budowy bazy danych pól ciśnienia, kalibracji algorytmu oraz interpretacji wyników eksperymentalnych. Takie podejście świadczy o dojrzałości badawczej Autora.
5. Na uwagę zasługuje również **opracowanie dedykowanego algorytmu estymacji parametrów lotu**, dostosowanego do specyfiki zastosowanego układu pomiarowego i ograniczeń obliczeniowych systemów pokładowych. Autor wykazuje się dobrą znajomością zagadnień związanych z przetwarzaniem sygnałów oraz implementacją algorytmów w czasie rzeczywistym.
6. Mocnym elementem pracy jest **bardzo dobra jakość uzyskanych wyników ilościowych**, w szczególności niskie wartości błędów średniokwadratowych dla kąta natarcia i kąta ślizgu, uzyskane w porównaniu z referencyjnym systemem inercyjnym. Wyniki te potwierdzają skuteczność zaproponowanego podejścia i jego przydatność do zastosowań praktycznych.
7. Rozprawa dowodzi również **wysokiego poziomu samodzielności badawczej Autora**. Zauważalnym jest fakt, że mgr inż. Maciej Cichocki brał aktywny udział w każdym etapie pracy – od koncepcji systemu, przez przygotowanie modeli numerycznych i stanowisk badawczych, aż po analizę wyników i ich interpretację.
8. Na pozytywną ocenę zasługuje także **jasna i logiczna struktura rozprawy**, która ułatwia śledzenie toku rozumowania Autora. Pomimo znacznego stopnia złożoności zagadnienia, praca została napisana w sposób czytelny i konsekwentny, a kolejne rozdziały logicznie wynikają z siebie.
9. Wreszcie, istotną zaletą rozprawy jest **potencjał dalszego rozwoju zaproponowanego rozwiązania**, co Autor słusznie wskazuje w części wnioskowej. Praca może stanowić solidną podstawę do dalszych badań zarówno w zakresie rozszerzenia algorytmów estymacji, jak i implementacji systemu w kolejnych generacjach obiektów raketowych.

6. Ocena końcowa przedłożonej rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza wysoki poziom wiedzy teoretycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez stosowną ustawę oraz mieści się w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

W związku z powyższym Recenzent **stawia wniosek o przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony pracy MGR. INŻ. MACIEJA CICHOCKIEGO.**

A handwritten signature in blue ink, reading "Paweł Baranowski". The signature is fluid and cursive, with the first name "Paweł" and the last name "Baranowski" clearly distinguishable.