

Kielce, dnia 15.12.2025 r.

prof. dr hab. inż. Zbigniew Koruba
Politechnika Świętokrzyska
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Katedra Mechatroniki i Uzbrojenia

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgra inż. Dariusza MIEDZIŃSKIEGO**
pt. **„Optymalizacja procesu sterowania pociskiem raketowym wyposażonym
w gazodynamiczny moduł sterujący”**

Podstawa wykonania recenzji: pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna dr. hab. inż. Marka Wojtyry, prof. uczelni przesłane z informacją o podjęciu Uchwały nr 249/III-IM/2025 r. z dnia 08 października 2025 r, w sprawie wyznaczenia mnie na recenzenta rozprawy Pana mgr, inż. Dariusza Miedzińskiego.

1. Sylwetka Doktoranta

Mgr inż. Dariusz Miedziński jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej, gdzie ukończył studia pierwszego stopnia w 2020 r. i drugiego stopnia w 2021 r. z wyróżnieniem na kierunku lotnictwo i kosmonautyka w specjalności automatyka i systemy lotnicze. We wrześniu 2025 r. ukończył Szkołę Doktorską Politechniki Warszawskiej składając rozprawę doktorską pt. „Optymalizacja procesu sterowania pociskiem raketowym wyposażonym w gazodynamiczny moduł sterujący”, której promotorem jest dr hab. inż. Robert Głębocki, prof. uczelni. Od października 2025 r. zatrudniony na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej na stanowisku asystenta badawczo-dydaktycznego. Od 2022 r. zatrudniony na stanowisku starszego specjalisty, a później eksperta w dużej firmie z przemysłu zbrojeniowego, gdzie jest zaangażowany w projekty realizowane na rzecz bezpieczeństwa i obronności państwa.

W swojej pracy badawczej skupia się na zagadnieniach związanych z modelowaniem i symulacją lotu obiektów latających, ze szczególnym uwzględnieniem rakiet i bezzałogowych statków powietrznych, a także ich sterowaniem, nawigacją i naprowadzaniem. Celem pracy naukowej jest rozwój metod modelowania, symulacji oraz optymalizacji sterowania, umożliwiających zwiększenie precyzji nawigacji obiektu i efektywności układów naprowadzania.



W prowadzonych badaniach wykorzystuje metody modelowania matematycznego i symulacji numerycznej, a także zagadnienia optymalizacji i sterowania optymalnego.

W czasie studiów mocno zaangażowany w działalność studenckiego koła naukowego związaną z technikami raketowymi. Laureat zespołowej nagrody naukowej Rektora I stopnia za projekt „*Opracowanie gazodynamicznego modułu sterującego, precyzyjnego naprowadzania dla pocisku raketowego*”. Autor i współautor wielu publikacji naukowych i materiałów konferencyjnych związanych z technikami raketowymi i BSP.

2. Ogólna charakterystyka i rozważania dotyczące rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Miedzińskiego pt. „*Optymalizacja procesu sterowania pociskiem raketowym wyposażonym w gazodynamiczny moduł sterujący*” została napisana na 140 stronach wraz ze spisem 154 pozycji literatury, uporządkowanych w kolejności odwołań; *Streszczeń* w języku polskim i angielskim; *Spisu treści*; *Wykazu skrótów i oznaczeń*; *Wstępu*; *7 Rozdziałów*, *Podsumowania*; *Bibliografii*; *Spisu rysunków, tabel i algorytmów*.

Rozprawa doktorska podejmuje niezwykle aktualny i złożony problem optymalizacji sterowania pociskiem raketowym klasy ziemia-ziemia. W dobie rosnącego znaczenia precyzyjnych środków rażenia, poszukiwanie metod na zwiększenie celności istniejących (i często niesterowanych) systemów raketowych, przy jednoczesnej minimalizacji kosztów i zużycia energii, jest jednym z kluczowych wyzwań współczesnej inżynierii mechanicznej i teorii sterowania.

Rozdział 1 (Wstęp) – wprowadza w tematykę sterowanych pocisków raketowych typu ziemia-ziemia, wskazując na problemy z celnością rakiet niesterowanych. Porównuje systemy sterowania aerodynamicznego i gazodynamicznego, wskazując na zalety i wady obu rozwiązań. Przedstawia cel pracy: opracowanie algorytmu sterowania dla pocisku z gazodynamicznym modułem (silnikami korekcyjnymi na stały materiał pędny), który ma na celu minimalizację błędu trafienia w cel naziemny oraz minimalizację zużycia energii (liczby użytych silników). Na koniec opisuje strukturę całej rozprawy.

Rozdział 2 (Przegląd dotychczasowych rozwiązań) – dokonuje przeglądu literatury naukowej. Opisuje zastosowanie gazodynamicznych układów sterowania (wykorzystujących silniki korekcyjne) w różnych istniejących systemach raketowych, m.in. Patriot PAC-3, THAAD czy Strix. Omawiane są klasyczne metody sterowania, takie jak nawigacja proporcjonalna (PNG) i podążanie za trajektorią referencyjną. Rozdział szczegółowo przedstawia też zaawansowane metody oparte na teorii sterowania optymalnego, w tym metody pośrednie (bazujące

na Zasadzie Maksimum Pontryagina), metody bezpośrednie (jak kolokacja), programowanie dynamiczne oraz sterowanie predykcyjne (MPC).

Rozdział 3 (Problem badawczy) – precyzuje główny problem pracy: opracowanie algorytmu sterowania dla pocisku z gazodynamicznym modułem, który redukuje dyspersję miejsc upadku (w odniesieniu do dużego rozrzutu rakiet FENIKS) przy minimalnym zużyciu energii. Wyjaśnia, że z powodu dostępności danych, jako platformę badawczą wykorzystano ракетę RPT ORION, opracowaną na Politechnice Warszawskiej i wyposażoną w 32 silniki korekcyjne. Przedstawia wieloetapową metodykę rozwiązania problemu (przedstawioną na Rysunku 3.4), obejmującą m.in. modelowanie, optymalizację sygnału ciągłego, dyskretyzację do impulsów silników i generację bazy danych. Na końcu formułuje tezę pracy.

Rozdział 4 (Model symulacyjny rakiety) – Opisuje budowę modelu symulacyjnego rakiety: przedstawia przyjęte założenia (m.in. bryła sztywna o 6 stopniach swobody, zmienna masa), używane układy współrzędnych oraz dynamiczne równania ruchu. Model uwzględnia ruch po wyrzutni, obciążenia od aerodynamiki, napędu, grawitacji i układu sterowania, a także model środowiska i jednostki IMU. Ponadto, opisuje implementację modelu w środowisku MATLAB/Simulink (przedstawioną na Rysunku 4.3) oraz jego późniejsze przeniesienie do języka C++ na potrzeby optymalizacji.

Rozdział 5 (Badania poligonowe Rakietowej Platformy Badawczej) – rozdział ten opisuje proces weryfikacji i walidacji modelu symulacyjnego w oparciu o dane z 14 testów poligonowych rakiety RPT ORION i stanowi najmocniejszy punkt rozprawy, wyróżniający ją na tle wielu prac czysto symulacyjnych. Model został zweryfikowany poprzez wprowadzenie do niego rzeczywistych danych rakiety ORION, m.in. charakterystyk bezwładnościowych, danych napędu głównego, silników korekcyjnych i aerodynamiki. Opisuje bazowy algorytm sterowania (oparty na nawigacji proporcjonalnej – PNG), który został opracowany na potrzeby testów. Model został zwalidowany przez porównanie wyników symulacji z danymi telemetrycznymi z lotów 011 i 014, co pozwoliło na dostrojenie m.in. parametrów aerodynamicznych. Na koniec, przy użyciu symulacji Monte Carlo, określono efektywność bazowego algorytmu PNG, który zredukował rozrzut (CEP50) o ok. 80% (z ~300 m do ~60 m) w porównaniu do lotu niesterowanego.

Należy podkreślić, że Autor nie tylko brał udział w pracach projektowych i testach rakiety RPT ORION, ale przede wszystkim wykorzystał dane z rzeczywistych testów lotnych do weryfikacji i walidacji (V&V) swojego modelu matematycznego. Opracowanie modelu bazowego PNG i wyznaczenie bazowej dyspersji metodą Monte Carlo jest wzorowym przykładem wyznaczenia punktu odniesienia dla nowych rozwiązań.



Rozdział 6 (Optymalizacja) – to naukowe jądro dysertacji. Autor staje przed kluczowym problemem: jak optymalizować system impulsowy (dyskretny) za pomocą metod gradientowych przeznaczonych dla systemów ciągłych. Decyzja o zastąpieniu dyskretnych silników dwoma ciągłymi parametrami sterującymi jest kluczowym i uzasadnionym metodologicznie uproszczeniem, umożliwiającym zastosowanie zaawansowanych narzędzi. Rygorystyczne porównanie metody bezpośredniej (NLP) i pośredniej (ZMP) jest bardzo cenne. Autor słusznie wykorzystał Zasadę Maksimum Pontryagina do wyprowadzenia gradientu funkcji kosztu, a do obliczeń zastosował nowoczesne oprogramowanie (IPOPT, ADOL-C). Kluczowym ustaleniem jest wielokrotnie większa szybkość obliczeniowa metody pośredniej przy zachowaniu tej samej, doskonałej dokładności. Jest to ważny wkład w metodykę rozwiązywania tego typu problemów.

W rozdziale tym zdefiniowana jest funkcja kosztu, która minimalizuje jednocześnie błąd trafienia w cel (koszt końcowy) i zużytą energię (koszt ciągły). Wyjaśniono też uproszczenie dyskretnego układu sterowania do dwóch ciągłych parametrów oraz normalizację czasu. Opisano użyte oprogramowanie: solver IPOPT (Interior Point OPTimizer) oraz pakiet ADOL-C do automatycznego różniczkowania. Porównuje dwie metody: bezpośrednią (traktującą problem jako standardowe NLP) oraz pośrednią (wykorzystującą Zasadę Maksimum Pontryagina do analitycznego wyznaczenia gradientu). Obie metody dały niemal identyczne, dokładne wyniki, jednak metoda pośrednia okazała się znacznie szybsza (średnio 20,9 min w porównaniu do 103,5 min), dlatego została wybrana do dalszych prac.

Rozdział 7 (Dyskretyzacja) – rozdział ten opisuje proces konwersji optymalnego, ciągłego sygnału sterującego z powrotem na dyskretny impuls silników korekcyjnych. Opisuje zatem "podróż powrotną" – od optymalnego sterowania ciągłego do dyskretnych impulsów. Czas odpalenia każdego silnika jest wyznaczany poprzez podział całki energii sygnału ciągłego na porcje równe impulsowi pojedynczego silnika. Kierunek odpalenia to uśredniona wartość kierunku sygnału ciągłego w tym samym przedziale czasu. Wykazano, że ten proces dyskretyzacji wprowadza błąd trafienia, ale jest on bardzo mały (średnio 6,88 m). Dodatkowa, szybka optymalizacja samych dyskretnych czasów i kierunków odpaleń pozwoliła zmniejszyć ten błąd do 6,40 m.

Metoda oparta na całce energii (impulsu)³⁷ i uśrednionym kierunku jest pomysłowa. Autor uczciwie przyznaje, że proces ten wprowadza błąd (rzędu kilku metrów). Bardzo dobrym pomysłem było wprowadzenie drugiego etapu optymalizacji, polegającego na "dostrojeniu" czasów i kierunków odpaleń, co pozwoliło zredukować błąd dyskretyzacji.

Rozdział 8 (Algorytm sterowania i wyniki) – prezentuje finalne rozwiązanie i jego kompleksową ocenę. Zaproponowany algorytm hybrydowy jest przejrzysty i praktyczny. Łączy on zalety optymalizacji offline (generacja bazy danych) z odpornością na zakłócenia w pętli zamkniętej. Mechanizm wyszukiwania najbliższej trajektorii referencyjnej i realizacja jej "otwartopętlowego" sterowania, uzupełnione o korektę w fazie końcowej z użyciem klasycznego PNG, to inteligentne rozwiązanie kompromisowe. Przeprowadzona analiza Monte Carlo jest wyczerpująca. Autor zbadał wpływ kluczowych parametrów: a) czas przełączenia: wykazano, że istnieje optymalny moment przełączenia (ok. 1500m 47), w którym algorytm hybrydowy pokonuje (o ok. 10%) klasyczne PNG 48, wykorzystując pełne 32 silniki49; b) wielkość bazy danych: analiza pokazała (co jest pewnym zaskoczeniem) stosunkowo niewielką wrażliwość na rozmiar bazy (w zakresie 200-944 elementów), co dobrze świadczy o odporności metody; c) liczba silników: to najbardziej spektakularny wynik pracy. Analiza dla 64 i 96 silników 51 pokazuje drastyczną przewagę opracowanej metody. Dla 96 silników, algorytm Doktoranta osiąga CEP50 na poziomie 7.5 metra, podczas gdy klasyczne PNG "tylko" 24 metry. To ponad trzykrotna poprawa, dowodząca, że metoda optymalizacyjna znacznie efektywniej zarządza dostępną energią sterowania.

Rozdział 9 (Podsumowanie) – podsumowuje całą pracę, przypominając cel i opracowaną metodykę (model, optymalizacja, dyskretyzacja, baza danych). Streszcza proces walidacji modelu na bazie danych rakiety RPT ORION oraz wyniki testów finalnego algorytmu, który okazał się skuteczniejszy od klasycznej nawigacji proporcjonalnej. Autor stwierdza, że postawiona teza badawcza została potwierdzona. Na koniec wskazuje kierunki dalszych prac, m.in. przeprowadzenie testów SIL/PIL/HIL oraz testy na raketach o większych osiąгах.

Ogólnie rzecz ujmując, tematyka rozprawy jest wysoce aktualna i posiada fundamentalne znaczenie zarówno z perspektywy naukowej, jak i aplikacyjnej. Autor słusznie zauważa we Wstępie, że głównym problemem raket niesterowanych jest ich niska celność, prowadząca do konieczności użycia salwowego, co generuje wysokie koszty i znaczne straty uboczne. Praca wpisuje się w światowy trend modernizacji uzbrojenia, polegający na implementacji modułów korekcyjnych (w tym przypadku gazodynamicznych) do istniejących platform.

Cel pracy, zdefiniowany jako „*opracowanie algorytmu sterowania pociskiem raketowym [...], który zapewniłby trafienie w cel naziemny [...] z wymaganą dokładnością i wykorzystał w tym celu minimalną ilość energii*”, jest ambitny i nowatorski. Połączenie wymogu celności z kryterium minimalizacji energii (przekładającej się na liczbę użytych silników korekcyjnych

stanowi trudne, wielokryterialne zadanie optymalizacyjne. Rozwiązanie tego problemu ma bezpośredni potencjał wdrożeniowy, co nadaje pracy wysoką wartość użytkową, szczególnie w kontekście rozwijanych w Polsce systemów raketowych.

Rozprawa charakteryzuje się klarowną, logiczną i spójną strukturą, prowadzącą czytelnika od definicji problemu, przez budowę narzędzi, aż po weryfikację wyników.

Ostatecznie stwierdzam, że układ i struktura rozprawy są poprawne, a źródła literaturowe są dobrane właściwie i w wystarczającej liczbie. Dokonany jest przegląd literatury, przedstawione są cel i obiekt badań. Naświetlone zostało także uzasadnienie wyboru tematu i określenie jego szerokiej problematyki, obejmującego przeprowadzenie wielu badań i analiz. Należy podkreślić, że przytoczone w przejrzysty sposób wyniki badań występują zarówno w wersji graficznej, jak i tabelarycznej. Na zakończenie rozprawy Doktorant dokonuje podsumowania i wyciąga trafne wnioski końcowe.

Wybór tematu rozprawy uważam za trafnie dobrany zarówno z teoretyczno-poznawczego, jak i przede wszystkim użytkowego punktu widzenia, jest ponadto aktualny i perspektywiczny.

Warto zaznaczyć, że zarówno opracowane metody jak i uzyskane wyniki cechują się oryginalnością. Ponadto, opiniowaną rozprawę doktorską można umieścić w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

3. Ocena zawartości merytorycznej rozprawy

Zawartość merytoryczną rozprawy chciałbym przedstawić w następujących poniżej wypunktowanych aspektach:

- 1) Wysoka wartość aplikacyjna i nowatorska: Praca rozwiązuje realny, aktualny i trudny problem inżynierski.
- 2) Połączenie teorii z praktyką: Praca jest unikalna dzięki walidacji modelu na podstawie danych z rzeczywistych testów poligonowych. Jest to rzadko spotykany atut w pracach doktorskich, nadający wynikom badań wysoką wiarygodność.
- 3) Kompletność metodologiczna: Doktorant przedstawił pełny, zamknięty proces badawczy: od modelu teoretycznego, przez jego rygorystyczną walidację, głęboką analizę teoretyczną optymalizacji, aż po projekt praktycznego algorytmu hybrydowego i jego wszechstronną ocenę.
- 4) Ścisłość w analizie optymalizacyjnej: Wyczerpujące porównanie metod bezpośredniej i pośredniej, uzasadniony wybór metodyki (ZMP + ADOL-C + IPOPT) oraz wykazanie jej wyższości obliczeniowej stanowi istotny wkład naukowy.



- 5) Przekonujące i skalowalne wyniki: Zaproponowany algorytm nie tylko dorównuje lub nieznacznie przewyższa klasyczne metody w konfiguracji bazowej (32 silniki), ale deklasuje je w scenariuszach z większą dostępnością energii sterującej (96 silników), co dowodzi jego fundamentalnej wyższości w efektywnym zarządzaniu energią.
- 6) Klarowność i dojrzałość naukowa: Praca jest napisana językiem precyzyjnym, a wywód jest logiczny i łatwy do śledzenia.

4. Uwagi krytyczne dotyczące rozprawy i obszary do dyskusji

Praca jest napisana na bardzo wysokim poziomie, jednak każda tak złożona analiza rodzi pytania i obszary do dalszej dyskusji. Moje uwagi nie umniejszają wartości rozprawy, lecz wskazują na jej naturalne ograniczenia i potencjalne kierunki dalszych badań.

- 1) Problem "luki" między modelem ciągłym a dyskretnym: Kluczowym uproszczeniem jest zamiana dyskretnych silników na ciągłe sterowanie. Chociaż wyniki optymalizacji ciągłej są doskonałe (błędy rzędu 10^{-5} m), to po dyskretyzacji błąd rośnie do kilku metrów. Rodzi to pytanie: czy minimalizując kryterium jakości na pewno minimalizujemy energię w systemie dyskretnym? Metoda "dostrojenia" jest krokiem w dobrym kierunku, ale nie jest to pełna optymalizacja w przestrzeni dyskretniej. Warto byłoby w dyskusji odnieść się do tego, jak duża może być "luka optymalności" między rozwiązaniem ciągłym a (potencjalnie nieosiągalnym) prawdziwym optimum dyskretnym.
- 2) Wrażliwość na błędy modelu i estymacji: Optymalizacja i generacja bazy danych odbywają się przy założeniu perfekcyjnej znajomości stanu (idealny INS). Tymczasem finalny algorytm musi działać w oparciu o dane zaszumione z rzeczywistych czujników (co jest zasygnalizowane w modelu w rozdziale 4.1.10, ale pominięte w optymalizacji). Algorytm wybiera z bazy "idealnych" trajektorii na podstawie "niedoskonałego" pomiaru. Powstaje pytanie, jak bardzo błędy nawigacyjne wpływają na wybór trajektorii referencyjnej i czy nie prowadzi to do wyboru suboptymalnego rozwiązania? Wprowadzenie korekty PNG w końcowej fazie wydaje się być właśnie "plastrem" na ten problem – algorytm w pętli otwartej jest wrażliwy na błędy, więc pętla jest zamykana "na siłę" pod koniec lotu.
- 3) Analiza wielkości bazy danych: W sekcji 8.3.2 Doktorant stwierdza niewielki wpływ wielkości bazy danych na wynik. Różnica w CEP50 między 800 a 200 elementami wynosi ok. 10 metrów (dla 600 elementów). Przy docelowych błędach trafienia rzędu 7-50 metrów, 10 metrów nie jest wartością "znikomą" (jak sugeruje Autor, choć odnosi

się to do ogółu). Warto byłoby głębiej przeanalizować, czy np. metoda wyboru trajektorii (najbliższa w sensie RMS) jest wystarczająco selektywna, czy może przestrzeń stanu nie została wystarczająco "gęsto" pokryta w procesie losowania.

- 4) Drobne uwagi edytorskie: W spisie rysunków (a także w treści pracy) występują dwa różne wykresy opatrzone tym samym numerem Rysunek 8.19 ("Wyniki rozrzutu..." oraz "Ilość wykorzystanych..." 81). Jest to drobne niedopatrzenie edytorskie, które w żaden sposób nie wpływa na merytoryczną wartość pracy.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Miedzińskiego pt. „*Optymalizacja procesu sterowania pociskiem raketowym wyposażonym w gazodynamiczny moduł sterujący*” jest wybitnym, dojrzałym i kompletnym dziełem naukowo-badawczym.

Doktorant wykazał się dogłębną znajomością zaawansowanej teorii sterowania optymalnego, mechaniki lotu oraz nowoczesnych narzędzi obliczeniowych. W sposób mistrzowski połączył rygorystyczne analizy teoretyczne i symulacyjne z danymi pochodzącymi z rzeczywistych eksperymentów poligonowych, co stanowi o unikalnej wartości tej pracy.

Przedstawiony algorytm sterowania, oparty na hybrydowej koncepcji bazy danych i korekcji w pętli zamkniętej, stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu. Jego skuteczność i efektywność (szczególnie w zakresie minimalizacji zużycia energii) została jednoznacznie dowiedziona w wyczerpujących symulacjach Monte Carlo.

Przedstawione uwagi krytyczne nie podważają fundamentalnej wartości dysertacji, a jedynie wskazują na naturalną złożoność problemu i stanowią przyczynek do dalszej dyskusji naukowej.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Miedzińskiego spełnia z nawiązką wszelkie wymogi formalne i merytoryczne stawiane rozprawom doktorskim, określone w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Praca stanowi oryginalne i istotne rozwiązanie problemu naukowego, wykazując głęboką wiedzę teoretyczną i umiejętności badawcze Doktoranta.

Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie mgr inż. Dariusza Miedzińskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie, biorąc pod uwagę wybitny, nowatorski charakter badań, ich silne powiązanie z praktyką inżynierską oraz doskonałe, w pełni udokumentowane wyniki, wnioskuję do Wysokiej Rady o **wyróżnienie** niniejszej rozprawy doktorskiej.