



Dr hab. inż. Grzegorz Kopecki, prof. PRz
gkopecki@prz.edu.pl
tel. 178651835

Rzeszów, 18.12.2025

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dariusza Miedzińskiego
Optymalizacja procesu sterowania pociskiem rakiетowym wyposażonym
w gazodynamiczny moduł sterujący

Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi uchwała nr 249/III-IM/2025 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 08.10.2025 roku przesłana wraz z pismem Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny i dołączoną do niego rozprawą doktorską mgr inż. Dariusza Miedzińskiego *Optymalizacja procesu sterowania pociskiem rakiетowym wyposażonym w gazodynamiczny moduł sterujący*. Promotorem jest dr hab. inż. Robert Głębocki, prof. uczelni.

Tematyka pracy oraz zasadność podjęcia tematu

Praca dotyczy metodyki projektowania optymalnego układu sterowania pociskiem rakiетowym z gazodynamicznym modułem sterującym. Obecnie bardzo istotnym jest rozwój potencjału obronnego państwa. Jednym z jego elementów jest budowa zdolności do projektowania, wykonywania oraz eksploatacji uzbrojenia. W Polsce produkowana i rozwijana jest broń rakiетowa, która jest istotnym elementem współczesnego uzbrojenia. Rakiety używane są do zwalczania obiektów na krótkich, średnich oraz długich dystansach. Ogólnie, tematyka prac badawczych związanych z technologią rakiетową jest uzasadniona i pożyteczna.

W rakiетach stosowane są systemy sterowania wykorzystujące siły aerodynamiczne, wektorowanie ciągu oraz sterowanie reakcyjne. Każdy sposób sterowania posiada wady oraz zalety. Sterowanie aerodynamiczne z wykorzystaniem powierzchni sterowych charakteryzuje zazwyczaj stosunkowo niska masa, prostota konstrukcji, nie wymagają dodatkowego paliwa ani układów gazodynamicznych, układy takie są bardzo skuteczne w atmosferze na niższych wysokościach, umożliwiają precyzyjne manewrowanie przy stosunkowo niewielkim koszcie sterowania (małe zużycie energii). Jednakże wraz z wysokością skuteczność sterów maleje, mogą również wystąpić problemy ze sterowaniem przy bardzo dużych prędkościach (duże obciążenie sterów, nagrzewanie). Układy mechaniczne mogą się również cechować ograniczoną niezawodnością. Układy wektorowania ciągu umożliwiają sterowanie zarówno na niskich, jak i wysokich pułapach, zapewniają bardzo dużą manewrowość i precyzję. Jednak ich budowa jest bardzo złożona, co istotnie wpływa na koszt produkcji rakiety oraz zwiększa ryzyko awarii. Trzecim sposobem sterowania jest zastosowanie układów gazodynamicznych i na tym typie sterowania została skupiona uwaga w recenzowanej pracy. Zaletami tych układów jest niewątpliwie bardzo szybka reakcja na wymuszenie, działanie w wyższych warstwach atmosfery. W przypadku zastosowania większej ilości silników reakcyjnych, można również zapewnić redundancję w przypadku awarii systemu. Niestety, sterowanie gazodynamiczne posiada wady:



w przypadku zastosowania paliwa stałego jest sterowaniem impulsowym oraz cechuje się stosunkowo wysoką złożonością. Zastosowanie tej metody wymaga więc zastosowania zaawansowanych metod projektowych. Realizacja układu sterowania gazodynamicznego jest więc zagadnieniem trudnym. Wcześniej realizowane prace (w tym w Politechnice Warszawskiej) pokazały jego zalety i możliwości. Przedstawiona do oceny praca doktorska stanowi naturalną kontynuację wcześniej prowadzonych prac, podejmując nowy temat badawczy, jakim jest synteza układu sterowania optymalnego. Zarówno więc temat pracy, jak i miejsce jej realizacji, są w pełni uzasadnione.

Treść rozprawy

Recenzowana praca składa się z dziewięciu rozdziałów. Dodatkowo, na początku zawiera wykaz skrótów i oznaczeń, na końcu bibliografię, spis rysunków, spis tabel oraz spis algorytmów.

Rozdział pierwszy stanowi wstęp do rozprawy. Wprowadza on krótko do tematyki sterowania raketami, opisuje również zawartość pracy.

Rozdział drugi zawiera przegląd dotychczasowych rozwiązań. Przedstawiono stosowane sposoby sterowania raketami, szczególnie koncentrując się na sterowaniu gazodynamicznym, jak również metody optymalizacji i sterowania optymalnego.

W rozdziale trzecim wyjaśniono problem badawczy będący celem pracy. Przedstawiono również metodykę rozwiązania zadania badawczego.

Rozdział czwarty omawia zastosowany model matematyczny i symulacyjny.

W rozdziale piątym opisano wyniki weryfikacji i walidacji modelu matematycznego, bazując na danych rakiety oraz wynikach jej testów lotnych.

Rozdział szósty opisuje metody optymalizacji. Opisane zostało wykorzystane oprogramowanie oraz sformułowany został problem optymalizacyjny i metody jego rozwiązania.

Rozdział siódmy prezentuje podejście do transformacji wyników optymalizacji na czasy i kierunki uruchomienia silników korekcyjnych.

Rozdział ósmy przedstawia docelowy algorytm sterowania, wraz z metodyką generacji bazy danych.

Rozdział dziewiąty stanowi podsumowanie pracy.

Ocena merytoryczna pracy

Oczywistym zadaniem broni raketowej jest uderzenie w zdefiniowany cel. Aby to zrealizować, stosowane są systemy sterowania. W pracy Autor skoncentrował się na sterowaniu gazodynamicznym. Jak już wspomniano, jest to zadanie trudne, ze względu na dużą dynamikę oraz impulsowy charakter sterowania. Sposób taki jest jednak wykorzystywany we współczesnych raketach, co zostało pokazane w przeglądzie literaturowym. Wspomniane zostały ракеты wykorzystujące taki sposób sterowania:



PAC-3 systemu Patriot, SM-3 oraz ukraiński system Wilcha. Autor wspomniał również rakiety przeciwpancerne oraz moździerzowe. Przegląd rozwiązań rakiet jest krótki lecz rzeczowy i koncentruje się na zagadnieniach, którym jest poświęcona praca. Więcej uwagi w przeglądzie Autor poświęcił zagadnieniom związanym z realizacją sterowania, różnym algorytmom (warianty nawigacji proporcjonalnej, sterowanie genetyczne czy rozmyte). Wspomniana tu została nawigacja proporcjonalna oraz podążanie za trajektorią referencyjną. Wymieniono również metody wizyjne, stosowane w sterowaniu raketami. Dalej, w sposób ogólny został przedstawiony problem sterowania optymalnego oraz sposób jego rozwiązania. Opisano m.in. tzw. metodę strzału, metodę gradientów zredukowanych, zastosowanie metod kolokacji, programowanie dynamiczne bazujące na zasadzie optymalności Bellmana, popularne w ostatnim czasie uczenie maszynowe i sieci neuronowe, sterowanie predykcyjne oraz inne metody. Opis powiązany z algorytmami jest również bardzo rzeczowy, wręcz hasłowy. Charakterystyczne dla opisu literaturowego zawartego w pracy jest skracanie opisu jedynie do niezbędnych treści i odsyłacze literaturowe. Jest to poprawna metoda opisywania podstaw teoretycznych, stosowana często w pracach naukowych. To, co moim zdaniem opis literaturowy by wzbogaciło, to bogatsza krytyczna analiza opisanych metod i podejść, pokazująca ich wady i zalety. Jednak moim zdaniem przegląd jest kompletny i pokazuje bardzo dobrą znajomość tematyki badawczej realizowanej przez Doktoranta.

Celem pracy było opracowanie i implementacja algorytmu sterowania pociskiem raketowym, z wykorzystaniem gazodynamicznego modułu sterującego. Sterowanie jest tak realizowane, aby zmniejszyć rozrzut miejsc upadku. Autor wspomniał również o efektywnym wykorzystaniu dostępnej w układzie energii sterowania. W tym miejscu korzystniejsza by była informacja nie tyle o efektywnym wykorzystaniu, co zapewnieniu, że sterowanie będzie tak zrealizowane, aby liczba silników nie przekraczała dostępnej liczby elementów – z punktu widzenia eksploatacji rakiety system sterowania zostanie zniszczony w momencie uderzenia, nie wydaje się więc celowe zmniejszanie liczby wykorzystanych w procesie sterowania silników (w zakresie ich dostępności w rakiecie). W badaniach wykorzystano raketę testową Politechniki Warszawskiej ORION, ze względu na dostępność tejże rakiety oraz znajomości danych niezbędnych do modelowania dynamiki. Autor poprawnie przedstawił problem badawczy i sposób jego rozwiązania. Wyróżnić tu można dwa zagadnienia: przygotowanie modelu symulacyjnego oraz syntezę układu sterowania. Istotnym problemem w pracy było zastosowanie metod optymalizacyjnych w układzie, w którym sygnałem sterującym jest sygnał dyskretny. Autor optymalizował sygnał sterujący jako sygnał ciągły, następnie dyskretyzował wyniki optymalizacji i wyznaczał czasy i kierunki uruchomienia silników sterujących. Postawiona została następująca teza pracy: *Wykorzystanie metod optymalizacji do wyznaczania parametrów sterowania raketą oraz sterowanie z wykorzystaniem bazy danych pozwoli skuteczniej i efektywniej naprowadzać raketę na cel stacjonarny.*

Niezbędnym elementem podczas syntezy i analizy algorytmów sterowania jest model symulacyjny obiektu. W pracy zastosowano typowy, modułowy model układu, w którym wyróżnić można blok realizujący równania ruchu. Wejścia do niego stanowią dane z modelu czujników, dane charakterystyk bezwładnościowych, dane środowiska, obciążenia aerodynamiczne. Modele czujników uwzględniają szумы oraz przesunięcie zera (błąd stałowartościowy). Uwzględnione zostało również



zachowanie się rakiety w wyrzutni prowadnicowej. Model środowiska bazuje na atmosferze standardowej, uzupełnionej o uwzględnienie wpływu wilgotności i dodatkowo umożliwiające zmiany temperatury i ciśnienia w miejscu startu oraz symulację podmuchów. Do transformacji układów współrzędnych wykorzystano algebrę kwaternionów, z korekcją. Szczególnie w przypadku obiektów operujących w pełnym zakresie kątów orientacji przestrzennej jest to poprawne podejście. W algorytmach bazujących na algebrze kwaternionów stosuje się korekcję w oparciu o normę kwaternionu (równanie 4.7). Równanie to zawiera czynnik normalizujący $((1-qq)q)$, zmniejszający wpływ błędów obliczeń numerycznych. Korzystniej by było zastosować czynnik normalizujący o postaci $k(1-qq)q$, gdzie k jest odpowiednio dobranym wzmocnieniem. Ogólnie, struktura modelu jest poprawna, uwzględnia wszystkie elementy niezbędne do realizacji procesu sterowania.

W ramach realizacji pracy doktorskiej zrealizowane zostały badania mające na celu dostrojenie parametrów modelu i zapewnienie zgodności modelu matematycznego – rzeczywistość. Czytając część pracy dotyczącą modelowania dynamiki lotu rakiety oraz weryfikacji modelu, nasuwa się w ramach dyskusji akademickiej kilka pytań. Przeprowadzono badania parametrów zespołu napędowego, z wykorzystaniem hamowni.

1. Ile eksperymentów zostało przeprowadzonych i jaka była rozbieżność w uzyskanych wynikach w funkcji czasu? Jeżeli rozbieżności były istotne – z czego one mogły wynikać?

Autor wyznaczył przebiegi charakterystyk aerodynamicznych w funkcji liczby Macha, z wykorzystaniem specjalnego oprogramowania.

2. Jakie to było oprogramowanie? Jakie zależności zostały wykorzystane, celem oszacowania parametrów aerodynamicznych?

Wysoko należy ocenić uzyskaną dokładność modelu, na podstawie przedstawionych wyników symulacji uzyskanych po identyfikacji danych aerodynamicznych.

3. Jakie jakości miary zdaniem Doktoranta można zastosować, aby ilościowo ocenić dokładność modelu matematycznego?

Biorąc pod uwagę zmienność takich parametrów, jak parametry masowe, ciąg silnika głównego, oraz ciąg silników korekcyjnych, Doktorant określił dyspersję (rozrzut) miejsca lądowania dla rakiety niesterowanej oraz dla rakiety sterowanej (rysunek 5.13). Punkty lądowania wyraźnie układają się wzdłuż pewnej prostej. Podobne zjawisko pojawia się w dalszych badaniach symulacyjnych (rysunki 8.6, 8.7, 8.9, 8.11, 8.13, 8.15, 8.17, 8.20, 8.22)

4. Co – zdaniem Autora – było przyczyną tego zjawiska?

Istotną częścią pracy są rozdziały poświęcone algorytmowi optymalizacyjnemu. Realizację tego zadania moim zdaniem należy ocenić wysoko. W celu uproszczenia modelu Autor przyjął założenie, że silniki korekcyjne nie wpływają na charakterystyki bezwładnościowe rakiety, co jest założeniem słusznym. Autor przyjął funkcję kosztu, w której wzięto pod uwagę kwadrat modułu różnicy położenia zadanego i miejsca upadku oraz całkę po czasie kwadratu sygnału sterującego (równania 6.1, 6.2). Określenie



funkcji kosztu jest kluczowym zadaniem podczas projektowania systemów optymalnych. Pojawia się tutaj pytanie:

5. Czy nie korzystniej by było wprowadzić współczynniki wagowe i zmniejszyć wpływ całej kwadratu sygnału sterującego?

Podczas prac nad algorytmem optymalizacyjnym Autor przebadiał wpływ wielkości bazy danych trajektorii na uzyskany wynik oraz wpływ dostępnych silników korekcyjnych. Jest to bardzo istotne zadanie z punktu widzenia praktycznej możliwości zrealizowania zadania konstrukcyjnego. W przyszłości można określić minimalną liczbę silników korekcyjnych, co przyczyni się do racjonalnego podejścia w konstruowaniu rakiety, jak również można określić minimalną liczbę trajektorii, co również ułatwi prace nad doбором komponentów cyfrowych układów sterowania.

Kompletny algorytm sterowania został zaimplementowany w środowisku symulacyjnym oraz przetestowany. Przedstawione wyniki są wiarygodne i wartościowe. Praca jest kompletna i stanowi rozwiązanie problemu naukowego, przedstawione treści pod względem merytorycznym należy ocenić bardzo wysoko.

Charakterystyka stylu oraz układu pracy

Przedstawiona do oceny praca napisana jest zrozumiałym, jasnym, poprawnym językiem. Jest napisana starannie, o czym świadczy niewielka liczba pomyłek (pojedyncze tzw. literówki). Doktorant przeanalizował wystarczającą, stosunkowo dużą liczbę pozycji literaturowych (154 pozycje), przedstawionych w kolejności cytowania. Zdarzają się w rozprawie błędy interpunkcyjne, niepoprawna odmiana, autor posługuje się w niektórych przypadkach sformułowaniami żargonowymi (np. „(...)sprawdzenie efektywności odsterowania rakiety w jednym kierunku” – str. 67, „(..) puszczono 1000 symulacji (...)” – str. 108, „Dysponując zapisaną telemetrią(...)” – str. 121), zdarzają się drobne pomyłki (np. „Maksymalna prędkość wirowania wyniosła ponad 4,7 Hz” – str. 58) czy nieprecyzyjne określenia („bardzo duża częstotliwość” – str. 161, „(..)trajektoria z telemetrii schodzi z kursu trochę wcześniej”). Nie wpływa to jednak negatywnie na całościowy odbiór pracy, która stanowi logiczną i powiązaną całość. Pomimo wyraźnej dbałości o formę graficzną pracy, niektóre rysunki są mało czytelne (np. 5.9, 5.10, 5.11, 6.2 – mała czcionka w opisie osi). W celu ułatwienia analiz korzystne by było przedstawienie wykresu błędów jako różnica pomiędzy danymi telemetrycznymi a danymi symulowanymi (rysunek 5.11). Podpisy rysunków 6.2 oraz 6.4 powinny zawierać informację wprost, że przedstawiono na nich różnice sygnałów (błędy). Nie jest korzystne umieszczane w pracach naukowych rysunków schematów blokowych Simulinka, celem przedstawienia ogólnej koncepcji systemu (rys. 4.3). Korzystniejsze by było przedstawienie schematu blokowego wykonanego w programie graficznym, z dbałością o czytelność opisu i czcionki.

Pomimo przedstawionych szczegółowych, drobnych uwag krytycznych podkreślić należy, że praca jest napisana bardzo starannie, zrozumiale, jest czytelna i stanowi logiczną całość.



Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedstawiona do oceny praca stanowi rozwiązanie problemu badawczego, jakim jest synteza optymalnego algorytmu sterowania pociskiem raketowym, wyposażonym w gazodynamiczny moduł sterujący. Autor wykazał się bogatą wiedzą z przedstawionego tematu, umiejętnościami syntezy i analizy układów sterowania. Opracował oryginalne podejście do syntezy układów sterowania raketami. Praca stanowi zwartą, logiczną całość. Pokazuje, że Autor posiada wiedzę z zakresu poruszanego tematu i potrafi samodzielnie organizować i realizować badania naukowe. Zawiera aspekty analizy teoretycznej, doświadczeń laboratoryjnych, doświadczeń symulacyjnych, realizacji badań w locie oraz syntezy i analizy układów sterowania. Uwagi przedstawione w recenzji mają w dużej mierze charakter polemiczny, stanowiący element konstruktywnej, krytycznej dyskusji akademickiej i nie umniejszają dokonań Doktoranta.

Podsumowując, **rozprawa doktorska** mgr inż. Dariusza Miedzińskiego *Optymalizacja procesu sterowania pociskiem raketowym wyposażonym w gazodynamiczny moduł sterujący* w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zawarte w ustawie z dnia 20 lipca 2018 roku o stopniach i tytule naukowym (Dz. U. 2023 poz. 742 z późniejszymi zmianami) i może stanowić podstawę do ubiegania się przez mgr inż. Jana Kierskiego o stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. **Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Dariusza Miedzińskiego do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.**

Biorąc pod uwagę zakres zrealizowanych prac oraz uzyskane wyniki, **stawiam wniosek o wyróżnienie pracy doktorskiej.**