

Dr hab. inż. Grzegorz Kopecki, prof. PRz
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa
Al. Powstańców Warszawy 12
35-317 Rzeszów
gkopecki@prz.edu.pl
tel. 178651835

Rzeszów, 10.06.2021

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mariusza Jacewicza

Dynamika i algorytmy sterowania raket w różnych fazach lotu przy użyciu silników korekcyjnych na paliwo stałe

Podstawa opracowania

Podstawę opracowania stanowi pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika, z dnia 21 kwietnia 2021 roku, sygn. RNDIM/II/4/2021 i dołączona do niego rozprawa doktorska mgr inż. Mariusza Jacewicza *Dynamika i algorytmy sterowania raket w różnych fazach lotu przy użyciu silników korekcyjnych na paliwo stałe*. Promotorem jest dr hab. inż. Robert Głębocki, prof. uczelni.

Tematyka pracy oraz zasadność podjęcia tematu

Praca dotyczy tematyki modelowania dynamiki raket oraz sterowania nimi w różnych fazach lotu, przy zastosowaniu silników korekcyjnych na paliwo stałe. Modele dynamiki obiektów latających, w tym raket, są nieprzerwanie rozwijane w wielu ośrodkach. Gazodynamiczne układy sterowania są wykorzystywane w eksploatowanych współcześnie konstrukcjach raketowych. Prace związane z projektowaniem uzbrojenia bardzo często są utajnione, przez co brak jest swobodnego dostępu do wyników badań. Jak podaje w pracy Doktorant (rozdział 7.1.2, str. 145), również dostęp do narzędzi, z wykorzystaniem których można przeprowadzić badania jest ograniczony, ze względu na ograniczenia eksportowe, takie jak na przykład ITAR (ang. *International Traffic in Arms Regulations*). Ze względów strategicznych istotne jest, aby w Polsce, prowadzone były prace badawcze związane z rozwojem techniki uzbrojenia oraz poznaniem zjawisk występujących podczas jej eksploatacji. Prace takie dają szansę zarówno na opracowanie nowych rodzimych konstrukcji, modyfikacje istniejących, jak i większą świadomość podczas eksploatacji sprzętu zakupionego za granicą. Dają możliwość nie tylko opracowania nowych, finalnych konstrukcji, lecz także komponentów wykorzystywanych w danym sprzęcie, wskazują kierunki potencjalnego rozwoju. Zagadnienia podjęte w pracy są pokrewne lotnictwu, naturalnym jest więc podjęcie tej tematyki badawczej na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Realizacja tematu pracy doktorskiej *Dynamika i algorytmy sterowania raket w różnych fazach lotu przy użyciu silników korekcyjnych na paliwo stałe* jest więc w pełni uzasadniona.

Treść rozprawy

Recenzowana praca składa się z trzynastu rozdziałów. W rozdziale pierwszym przedstawiono wprowadzenie do pracy. Określony został cel rozprawy, którym było zbadanie dynamiki raket wyposażonych w gazodynamiczne układy wykonawcze sterowania w różnych stanach lotu, a następnie opracowanie algorytmów uruchamiania gazodynamicznych silników korekcyjnych. Omówiony został obszar, zakres i tematyka badań przedstawionych w kolejnych rozdziałach. Sformułowana została teza badawcza pracy, brzmiąca: „silniki korekcyjne na paliwo stałe o impulsowym sposobie działania pozwalają efektywnie i z wymaganą precyzją sterować obiektami o napędzie raketowym w różnych fazach lotu”.

W rozdziale drugim przybliżony został sposób sterowania gazodynamicznego. Zostały omówione właściwości układów, w których stosuje się silniki korekcyjne, w porównaniu do sterowania z wykorzystaniem powierzchni aerodynamicznych.

Rozdział trzeci opisuje metody startu raket. Autor opisał w szczególności start z wykorzystaniem sterowania gazodynamicznego. Ten rodzaj startu nazwany został w pracy pionowym „miękkim” startem.

W rozdziale czwartym dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych pocisków wyposażonych w stery gazodynamiczne. Zaprezentowano konstrukcje wykorzystujące silniki gazodynamiczne zarówno w fazie startu, jak również w fazie naprowadzania.

Rozdział piąty poświęcono przeglądowi literatury na temat metod oddziaływania na pocisk przy pomocy silników korekcyjnych.

W rozdziale szóstym przedstawiony został zrealizowany w ramach pracy model matematyczny rakiety. Zaprezentowano ogólny opis przyjętej metodologii modelowania oraz przyjęte założenia i uproszczenia. Przedstawione zostały podstawowe informacje o raketach stanowiących platformy testowe. Opisane zostały układy współrzędnych stosowane przy opisie raket, metody opisu orientacji przestrzennej oraz równania ruchu obiektu. Omówiono przyjęty model zmienności charakterystyk masowo-bezwładnościowych i model układów pomiarowych.

W rozdziale siódmym opisano metodykę wyznaczania bezwymiarowych współczynników sił i momentów sił aerodynamicznych dla badanych raket. Przedstawiono wyniki obliczeń uzyskane przy wykorzystaniu oprogramowania PRODAŚ i MISL3. Przedstawiono również opis wyników uzyskanych na podstawie badań w poddźwiękowym tunelu aerodynamicznym modelu materialnego rakiety 152.4 mm.

W rozdziale ósmym przedstawiono problematykę implementacji modelu symulacyjnego w środowisku MATLAB/Simulink. Omówiono również zastosowaną metodologię weryfikacji modeli symulacyjnych. Przedstawiono także przykładową analizę porównawczą rezultatów symulacji numerycznych i prób w locie dla jednego z użytych demonstratorów (rakietą 122 mm).

Rozdział dziewiąty omawia metody naprowadzania przy wykorzystaniu silników korekcyjnych na paliwo stałe. Omówione zostały dwa algorytmy sterowania rakiety 122 mm w pasywnej (końcowej) fazie lotu. Następnie przedstawiono metodę realizacji manewru obrotu rakiety 152.4 mm nad wyrzutnią, bezpośrednio po starcie (wyrzucie rakiety z wyrzutni).

W rozdziale dziesiątym opisano wyniki symulacji komputerowych dla rakiety kalibru 122 mm. Przebadano wpływ zmian poszczególnych parametrów modelu na rozrzut.

W rozdział jedenastym przedstawiono wyniki symulacji komputerowych dla rakiety kalibru 152.4 mm. Przeanalizowano różne scenariusze przebiegu lotu. Badania symulacyjne poprzedzały próby naziemne rzeczywistych obiektów oraz badania w locie.

Próby te zostały przedstawione w rozdziale dwunastym. Przedstawiono wyniki badań naziemnych układu wykonawczego rakiety kalibru 152.4 mm oraz wyniki badań poligonowych. Rozdział ten prezentuje wyniki każdego eksperymentu w locie (strzału), również nieudanego, w formie szczegółowego sprawozdania. Wyniki badań poligonowych fazy startu rakiety 152.4mm porównano z wynikami symulacji numerycznej. Analizę porównawczą przedstawiono na podstawie eksperckiej oceny przebiegów czasowych poszczególnych parametrów.

Rozdział trzynasty jest podsumowaniem rozprawy, zawierającym najważniejsze wnioski, kwestię możliwości wykorzystania uzyskanych wyników oraz potencjalne kierunki dalszych badań. Autor stwierdził, że przedstawiona we wstępie teza pracy została udowodniona.

Ocena merytoryczna pracy

Zadaniem układu sterowania rakieta jest doprowadzenie jej do celu, z wykorzystaniem sterów aerodynamicznych, bądź też sterowania gazodynamicznego. W pracy przebadano możliwość wykorzystania drugiego rozwiązania. Autor, na podstawie analizy literaturowej, do badań wybrał dwa możliwe do zastosowania scenariusze: lot według zadanej trajektorii i korekty tej trajektorii w czasie lotu oraz predykcję punktu upadku. Istotnym zadaniem była również realizacja startu rakiety nazwanego w pracy „miękkim” startem. Analiza literaturowa pracy zawiera szczegółowe opisy istniejących konstrukcji raket oraz opis sposobów sterowania. Pewien niedosyt budzi ubogi opis możliwych do zastosowania algorytmów sterowania, przedstawiony niejako przy okazji opisu podejść do sterowania (sterowanie aerodynamiczne, gazodynamiczne). Został on co prawda nieznacznie uzupełniony w dalszej części pracy (rozdział 9.2), jednak zagadnienia związane ze stosowanymi algorytmami sterowania powinny być czytelnikowi przedstawione w zwartej formie w przeglądzie literaturowym. Na usprawiedliwienie Doktoranta przyznać należy, że dyskretna forma oddziaływania silników gazodynamicznych na dynamikę rakiety niesie ze sobą duże zawężenie możliwych do zastosowania metod sterowania.

Wysoko oceniam część pracy poświęconą modelowaniu dynamiki lotu rakiety. Zawarty w rozdziale szóstym opis podstaw teoretycznych charakteryzuje się stylem podręcznikowym, ponieważ jednak celem pracy było zbadanie dynamiki raket, szerszy opis podstaw teoretycznych jest usprawiedliwiony. Podczas opracowania modelu matematycznego Doktorant wyznaczył charakterystyki aerodynamiczne, korzystając zarówno z dostępnego oprogramowania, jak również wykorzystał badania w tunelu aerodynamicznym. Model został zaimplementowany w środowisku Matlab-Simulink. Zaprezentowane wyniki testów mających na celu ocenę dokładności modelu (rozd. 8.3.2 oraz 8.3.3, str. 199-210) pokazuje bardzo dużą dokładność odwzorowania rzeczywistości przez model. Podobnie późniejsza analiza porównawcza badań w locie układu sterowania oraz modelu (rozdział 12.9, str. 429-438). Walidacja modelu symulacyjnego przedstawiona w rozdz. 12.9, bazuje na eksperckiej analizie porównawczej przebiegów czasowych parametrów lotu zarejestrowanych w ramach badań poligonowych oraz symulacyjnych, według analogicznego scenariusza. Korzystnym

by było dodatkowo porównanie parametrów charakterystycznych dla układów oscylacyjnych, takich jak okresy oscylacji lub częstotliwości dla modelu i rzeczywistej rakiety, logarytmicznego dekrementu tłumienia, itp. Są to wielkości, które mogą stanowić wskaźnik jakości odwzorowania rzeczywistości, obok przedstawionych w rozdziale 8.3.2 oraz 8.3.3 wartości współczynnika korelacji pomiędzy parametrami zarejestrowanymi w locie oraz modelowymi dla: prędkości lotu, zasięgu, wysokości obiektu. Korzystne by było również określenie, jak przyjęta zmienność parametrów, które Autor opisał w rozdziale poświęconym czynnikom wpływającym na rozrzut (rozdział 10.4.1, str. 312) wpływa na wspomniane parametry oscylacji i określenie przedziału zmienności tych parametrów. Uwagi dotyczące modelowania dynamiki lotu rakiety nie umniejszają jednak w żaden sposób dokonań Autora w tym zakresie, stanowią raczej punkt wyjścia do dyskusji akademickiej, dotyczącej modelowania obiektów latających oraz metodyki oceny modeli. W ramach dyskusji na obronie proszę o odpowiedź na następujące pytania:

1. W jaki sposób w modelu dynamiki rakiety uwzględnione zostały efekty żyroskopowe?
2. Czy znana jest Doktorantowi dokładność odwzorowania modeli rakiet, zrealizowana przez inne ośrodki? Jakie miary podobieństwa są stosowane?
3. Czy podczas modelowania czujników prędkości kątowych uwzględniony został ruch dobowy Ziemi? Jakie są zdaniem Autora minimalne wymagania dotyczące dokładności możliwych do zastosowania w rakiecie czujników?

W ramach części pracy dotyczącej sterowania rakieta Autor przeanalizował w sposób przybliżony efektywność działania silników korekcyjnych oraz zdefiniował warunki, przy których następuje uruchomienie silników korekcyjnych (rozdział 9.2.1). Zostały zrealizowane dwa algorytmy sterowania w końcowej fazie lotu. Z przedstawionych w pracy badań symulacyjnych jednoznacznie wynika, że algorytm oparty na predykcji punktu upadku umożliwia uzyskanie większej celności. Autor zwrócił uwagę, że praktyczna realizacja tego algorytmu jest trudniejsza. Pamiętać jednak należy, że obecne narzędzia umożliwiające sprawną implementację algorytmów dają duże możliwości i sama implementacja modelu atmosfery czy wartości współczynników aerodynamicznych w funkcji parametrów lotu w układzie mikroprocesorowym jest coraz prostsza do zrealizowania.

Zadaniem podjętym w ramach pracy była realizacja „miękkiego” startu rakiety. Sterowanie takie jest możliwe poprzez sekwencyjne uruchomienie dwóch silników impulsowych. Przebadany został wpływ prędkości początkowej na przebieg manewru obrotu nad wyrzutnią, wpływ odcinka czasowego pomiędzy uruchomieniem silników korekcyjnych na manewr, wpływ chwili czasu uruchomienia silnika głównego rakiety na kąt pochylenia oraz wpływ zaburzeń początkowych. Pokazane zostało znaczenie rozwiązań konstrukcyjnych wyrzutni na realizację lotu. Istotna była eliminacja niekontrolowanego obrotu wokół osi podłużnej rakiety. Rodzi się pytanie w dyskusji, na ile nawet bardzo ograniczone i uproszczone sterowanie z wykorzystaniem sterów aerodynamicznych, pomogłoby zapewnić odpowiednią jakość sterowania w tej fazie lotu. Może to stanowić tematykę przyszłych badań.

Cennymi dla pracy są próby w locie „miękkiego” pionowego startu. Jest to istotne osiągnięcie, gdyż nie są znane publikacje dotyczące realizacji takiego zadania w Polsce. Pozwoliły one zweryfikować poprawność proponowanych rozwiązań algorytmów sterowania oraz dały informację o praktycznym działaniu systemu jako całości. Udana próba wykazała poprawność działającego systemu. Fakt, że część prób nie zakończyła się sukcesem ze względów technicznych, jest typowa dla

testów prototypu, zawsze jednak rodzi pytania dotyczące poziomu niezawodności ostatecznego rozwiązania. Bardzo niebezpieczne było nieuruchomienie się tylko jednego z silników korekcyjnych.

4. Czy Doktorant widzi możliwość detekcji w locie braku uruchomienia się silnika korekcyjnego?

Skuteczna detekcja sytuacji niebezpiecznej pozwoliłaby przewidzieć możliwość alternatywnego uruchomienia innego silnika korekcyjnego.

W podsumowaniu pracy Autor przedstawił kierunek dalszych prac. Wskazano jako interesujące między innymi porównanie rozmiaru stref osiągalności rakiety sterowanej aerodynamicznie i gazodynamicznie, czy analizę sterowania bezpośrednio po wylocie z prowadnicy rurowej. Doktorant widzi więc możliwość dalszych prac i dalszego rozwoju metodyki i zakresu badań w przedstawionym temacie.

Charakterystyka stylu oraz układu pracy

Przedstawiona do oceny praca cechuje się zrozumiałym, jasnym, wręcz podręcznikowym językiem. Jest napisana starannie, o czym świadczy niewielka liczba pomyłek (pojedyncze tzw. literówki). Zdarzają się w rozprawie nieliczne błędy interpunkcyjne, autor posługuje się w niektórych przypadkach sformułowaniami żargonowymi. Nie wpływa to jednak negatywnie na całościowy odbiór pracy, która stanowi logiczną i powiązaną całość. Lista najważniejszych uwag redakcyjnych zostanie przekazana bezpośrednio Autorowi.

Doktorant przeanalizował bardzo dużą, wręcz imponującą liczbę pozycji literaturowych (437 pozycji), przedstawionej w kolejności cytowania (z drobnymi niekonsekwencjami). W skład bibliografii wchodzi zarówno publikacje książkowe, zawierające podstawowe informacje dotyczące dynamiki i sterowania rakiet, jak również artykuły prezentujące wyniki badań. Zawarte są również odnośniki do niepublikowanych badań w formie raportów czy instrukcji ćwiczeń laboratoryjnych, co jest uzasadnione i świadczy o rzetelności Doktoranta. Jedno cytowanie jest niewłaściwe: fotografia własnego autorstwa nie jest źródłem bibliograficznym (pozycja 85). W bibliografii znajduje się 13 pozycji współautorstwa mgra inż. Mariusza Jacewicza (nie wliczając wspomnianej fotografii).

Pracę cechuje duża dbałość o formę graficzną. Przedstawione rysunki są czytelne, wysokiej jakości. Jedynie w tabelach w rozdz. 10, które prezentują zestawienie wykresów punktowych rozrzutu rakiety, opisy na rysunkach przedstawione są zbyt małą czcionką (tab. 10.17 – 10.24). Zaznaczyć jednak należy, że również te rysunki w sposób czytelny prezentują uzyskane wyniki. Rysunek 8.2 (str. 185) jest mało czytelny (schemat modelu symulacyjnego w Simulinku) i niewiele wnosi w stosunku do treści przedstawionych na rys. 8.1.

Rozprawa jest bardzo obszerna (485 stron). Wynika to niewątpliwie z chęci rzetelnego i dokładnego przedstawienia tematu, jednak zdecydowanie korzystniejsze by było przedstawienie prezentowanych treści w krótszej formie. Fragmenty, które opisują stosunkowo proste zagadnienia (np. rozdz. 2, poświęcony metodom generowania sił sterujących w odniesieniu do rakiet) jest opisana zbyt obszernie. W przypadku dużej części analiz (rozdziały 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12), jeżeli Autor chciał przedstawić szczegóły, możliwe było wydzielenie zasadniczej części pracy oraz dodatków. Umożliwiłoby to omówienie w sposób syntetyczny wyników badań oraz przedstawienie szczegółów. Przykładowo, Autor w rozdziale 4 opisuje szczegółowo rozwiązania konstrukcyjne rakiet

z gazodynamicznymi systemami sterowania (rozd. 4, strony 50-77). Korzystniejsze by było krótkie wymienienie charakterystycznych cech rozwiązań i wnioski z przeglądu. Jeżeli Autor chciał przedstawić szczegóły konstrukcyjne rozwiązań zawarte w rozdziale 4, można je było umieścić w dodatku do pracy. Podobnie, w pracy zaprezentowano opis oraz ilustracje graficzne wyrzutni „Grad” (rozd. 8.3.1, str 192), które niewiele wnoszą do tematyki pracy. Inny wyrazisty przykład zbyt długiego opracowania stanowi opis wyników prób poligonowych (rozdział 12), opisanych w formie raportu z każdej, również nieudanej, próby. Korzystniejsze w odbiorze by było przedstawienie opracowania syntetycznego, pokazującego, że teza pracy została udowodniona, natomiast raport w przedstawionej formie mógłby stanowić dodatek do pracy. W rozprawie występują również fragmenty charakterystyczne dla podręcznika, które w pracy doktorskiej można było pominąć. Przykładem jest tu opis oczywistej roli oprogramowania Matlab we współczesnych zastosowaniach naukowo-technicznych (rozdział 8.1, str. 184). Pewne fragmenty czy sformułowania opisują oczywiste fakty (np. zbędna informacja o operacji na macierzach, str. 109).

Pomimo przedstawionych uwag krytycznych podkreślić należy, że praca jest napisana starannie i stanowi logiczną całość. Na szeroką objętość pracy i precyzyjne, dydaktyczne określanie szczegółów można spojrzeć również jako na pewną zaletę: mniej zapoznany z tematem czytelnik może zrozumieć przedstawione treści, bez sięgania po inne pozycje literaturowe. Praca może również stanowić bazę do opracowania podręcznika akademickiego na temat modelowania dynamiki rakiet i sterowania nimi.

Podsumowanie i wnioski końcowe

Przedstawiona do oceny praca stanowi rozwiązanie problemu badawczego, jakim jest stworzenie modelu dynamiki oraz algorytmów sterowania rakieta, z wykorzystaniem silników korekcyjnych na paliwo stałe. Stanowi ona zwartą, logiczną całość. Pokazuje, że Autor posiada bogatą wiedzę z zakresu poruszanego tematu, potrafi rozwiązywać problemy naukowe. Częstkowe wyniki pracy zostały przedstawione na renomowanych konferencjach (Euro GNC 2019 – Włochy, Automation 2018, 2020 – Szwajcaria, Mechanika w Lotnictwie 2018 – Kazimierz Dolny), oraz opublikowane w recenzowanych czasopismach naukowych (Pomiary Automatyka Robotyka, Archive of Mechanical Engineering, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Journal of Theoretical and Applied Mechanics, Problemy Techniki Uzbrojenia, Aerospace). Dorobek doktoranta w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna* (dawna *Mechanika* oraz *Budowa i Eksploatacja Maszyn*) jest bogaty i świadczy o dużym zaangażowaniu w prace badawcze, z dużym nadmiarem spełnia ustawowe oraz zwyczajowe wymogi stawiane podczas realizacji pracy doktorskiej.

Podsumowując, **rozprawa doktorska** mgra inż. Mariusza Jacewicza *Dynamika i algorytmy sterowania rakiet w różnych fazach lotu przy użyciu silników korekcyjnych na paliwo stałe* zrealizowana na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej w pełni **spełnia wymagania** stawiane pracom doktorskim **zawarte w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki** (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i może stanowić podstawę do ubiegania się przez mgra inż. Mariusza Jacewicza o stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. **Stawiam wnioski o dopuszczenie mgra inż. Mariusza Jacewicza do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.**

