

Warszawa, 20.04.2017

dr hab. inż. Leszek Baranowski, prof. WAT

Katedra Mechatroniki

Wydział Mechatroniki i Lotnictwa

Wojskowa Akademia Techniczna

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza NOCONIA pt.

„Opracowanie i analiza algorytmów naprowadzania przeciwpancernego pocisku raketowego trzeciej generacji z możliwością omijania przeszkód”

Podstawą sporządzenia recenzji było pismo Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn, Pana prof. dra hab. inż. Tomasza L. STAŃCZYKA realizującego Uchwałę Rady Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej nr 1/2017 z dnia 19.01.2017 r.

1. Ocena wyboru tematu pracy

Problematyka podjęta w pracy wychodzi naprzeciw aktualnym potrzebom Sił Zbrojnych RP. Należy zauważyć, iż trudno jest znaleźć informacje o systemach sterowania współczesnymi przeciwpancernymi pociskami kierowanymi trzeciej generacji. Niewątpliwie opracowane i przebadane symulacyjnie przez Doktoranta algorytmy sterowania PPK z możliwością omijania przeszkód z powodzeniem mogłyby być wykorzystane przez polski przemysł zbrojeniowy w projektach mających na celu opracowanie nowych inteligentnych pocisków przeciwpancernych.

Biorąc powyższe pod uwagę uważam temat rozprawy mgr. inż. Łukasza Noconia za aktualny i perspektywiczny.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Noconia została napisana na 117 stronach wraz ze spisem 82 pozycji literatury uporządkowanej alfabetycznie, spisem treści, spisem oznaczeń również uporządkowanym alfabetycznie (brak jest wykazu rysunków i tabel). Podzielona została na wstęp, sześć rozdziałów oraz jeden załącznik zawierający dane o charakterystykach aerodynamicznych hipotetycznego pocisku raketowego rozpatrywanego w pracy. Należy odnotować, iż Doktorant jest autorem 1 pozycji literaturowej (artykuł w materiałach konferencyjnych) oraz współautorem 11 pozycji literaturowych zamieszczonych w Bibliografii

(tj. 2 publikacji w czasopiśmie z listy A i 2 z listy B MNiSW oraz 5 publikacji w materiałach konferencyjnych i 2 rozdziałów w monografiach).

We **wstępie** Doktorant krótko scharakteryzował przeciwpancerne pociski kierowane (PPK) oraz omówił zawartość każdego z sześciu rozdziałów pracy.

W **rozdziale pierwszym** znajdujemy przegląd historyczny rozwoju broni precyzyjnego rażenia ze szczególnym uwzględnieniem kolejnych generacji przeciwpancernych pocisków kierowanych. Końcowe rozważania nad stanem obecnym broni przeciwpancernej w Siłach Zbrojnych RP, a zwłaszcza dotyczące informacji o zleceniu przez MON opracowywania prototypu nowego przeciwpancernego pocisku kierowanego (kryptonim Pirat), pozwoliły Doktorantowi na sformułowanie następującego celu pracy:

„celem pracy jest opracowanie autorskich algorytmów sterowania lotem przeciwpancernego pocisku kierowanego zdolnych do aktywnej zmiany parametrów lotu w celu ominięcia przeszkody wraz z analizą kinematyki i dynamiki tego pocisku raketowego podczas jego naprowadzania na opancerzony cel”.

Zdaniem Autora opracowane algorytmy sterowania mogłyby być wykorzystane w demonstratorze technologii tegoż nowoopracowywanego PPK.

W **rozdziale drugim** Autor przedstawił metodykę modelowania matematycznego dynamiki lotu przeciwpancernego pocisku kierowanego o zmiennej masie, będącego obiektem sterowania, przy uwzględnieniu następujących założeń upraszczających:

- pocisk traktowany jest jako bryła sztywna i jest stabilizowany w kącie przechylenia (nie obraca się dookoła własnej osi),
- ze względu na niewielkie zmiany wysokości lotu gęstość powietrza jest stała,
- charakterystyki aerodynamiczne pocisku nie zależą od liczby Macha,
- jest możliwość generowania sił sterujących w układzie prędkościowym.

W pierwszej kolejności zostały wyprowadzone dynamiczne równania ruchu postępowego PPK przy wykorzystaniu równań Lagrange'a II rodzaju w układzie opływu (prędkościowym). Następnie dokonano wyprowadzenia niezbędnych macierzy transformacji, stosując klasyczny system obrotów z pierwszym obrotem wokół osi pionowej y , następnie wokół osi poziomej z' i na koniec wokół osi x'' . Dynamiczne równania ruchu postępowego zostały uzupełnione równaniami kinematycznymi.

W kolejnym kroku zostały wyprowadzone dynamiczne wektorowe równania ruchu obrotowego PPK (tzw. część kulista) na podstawie twierdzenia o zmianie krętu bryły sztywnej. Celem uzyskania skalarnych równań, równania wektorowe zostały zrzucone na osie układu związanego z obiektem $Oxyz$.

Na końcu rozdziału Autor zamieścił podstawowe charakterystyki geometryczne i masowo-bezwładnościowe hipotetycznego pocisku raketowego, będącego obiektem sterowania w dalszych badaniach symulacyjnych.

Niewątpliwie mocną stroną tego rozdziału jest wykorzystanie równań Lagrange'a II rodzaju do wyprowadzenia równań ruchu PPK w układzie prędkościowym oraz metodyka wyprowadzenia równań ruchu względnego obiektu latającego i celu w układzie związanym z LOC.

W **rozdziale trzecim** znajdujemy opis autorskich, opracowanych przez Doktoranta, algorytmów sterowania PPK według następujących metod:

- metody płaskotorowego naprowadzania w systemie SACLOS,
- metody naprowadzania z wykorzystaniem funkcji trygonometrycznych,
- metody stałego promienia,
- metody wykorzystującej funkcje wielomianowe trzeciego stopnia.

Na uproszczonych równaniach dynamiki lotu z rozdziału drugiego przeprowadzona została wstępna analiza numeryczna wykorzystania tych algorytmów w procesie naprowadzania hipotetycznego PPK. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych do dalszej analizy Doktorant wskazał metodę wykorzystującą funkcje wielomianowe trzeciego stopnia.

Moim zdaniem na uwagę zasługują następujące zagadnienia tego rozdziału:

- przekształcenie na potrzeby pracy różniczkowych równań ruchu podłużnego PPK z dziedziny czasu w dziedzinę współrzędnej x_g układu ziemskiego,
- autorskie algorytmy sterowania PPK trzeciej generacji umożliwiające omijanie przeszkód terenowych,
- wyniki przykładowych badań numerycznych porównania skuteczności opracowanych algorytmów w procesie naprowadzania PPK na cele ruchome.

Rozdział czwarty poświęcono rozszerzonej analizie algorytmu wykorzystującego funkcje wielomianowe trzeciego stopnia. Na potrzeby badań symulacyjnych siły sterujące wyrażono poprzez kąty wychylenia sterów aerodynamicznych oraz zmianę kierunku wektora ciągu silnika raketowego. Wyniki trzech przykładowych procesów naprowadzania z wykorzystaniem w sterowaniu regulatora PID zobrazowano na wykresach. Celem zbadania odporności algorytmu sterowania na zakłócenia zewnętrzne opracowano model matematyczny oddziaływania wiatru na pocisk raketowy oraz przeprowadzono przykładowe obliczenia numeryczne naprowadzania PPK z uwzględnieniem silnego podmuch bocznego. Na zakończenie dokonano analizy działania regulatora liniowo-kwadratowego opracowanego na podstawie zlinearyzowanych równań ruchu pocisku i minimalizacji kwadratowego wskaźnika jakości.

Chciałbym podkreślić następujące cenne wyniki tego rozdziału:

- uzyskanie realnych wielkości kątów wychylenia organów sterowania (sterów aerodynamicznych i dyszy silnika raketowego) wymaganych do zrealizowania naprowadzania po zaprogramowanych wielomianami trzeciego stopnia trajektoriach lotu hipotetycznego PPK z wykorzystaniem w sterowaniu regulatora PID.
- wykazanie, iż zastosowanie metody projektowania układu sterowania z wykorzystaniem linearyzacji równań ruchu nie daje dobrych efektów w sterowaniu obiektem rzeczywistym (nieliniowym i niestacjonarnym).

Rozdział piąty zawiera wyprowadzenie równań dynamiki lotu PPK jako bryły sztywnej o sześciu stopniach swobody w układzie związanym z pociskiem. Rozszerzeniem modelu w stosunku do modeli poprzednich jest uwzględnienie nieliniowej zależności charakterystyk aerodynamicznych obiektu latającego od liczby Macha oraz przestrzennego kąta natarcia.

W rozdziale tym można wyróżnić przeprowadzone analizy numeryczne w oparciu o pełen nieliniowy i niestacjonarny model dynamiki lotu PPK potwierdzające poprawność opracowanych algorytmów sterowania, a tym samym zrealizowanie celu pracy.

Rozdział szósty stanowi podsumowanie rozprawy, natomiast w **załączniku** przedstawiono wykresy charakterystyk aerodynamicznych hipotetycznego PPK.

3. Uwagi krytyczne i pytania do pracy

Mam następujące uwagi merytoryczne i pytania odnoszące się do poszczególnych rozdziałów pracy.

Do spisu treści i Spisu ważniejszych oznaczeń:

1. Tytuł rozdziału 2 brzmi „*OPRACOWANIE MODELU PRZECIWPANCERNEGO POCISKU KIEROWANEGO*” – należałoby uszczegółowić o jaki model chodzi?
2. Punkt 2.4 spisu treści ma tytuł „*Własności geometryczne i masowe obiektu sterowania*” – raczej „*Właściwości geometryczne i ...*” albo „*Charakterystyki geometryczne i ...*”.

