

dr hab. inż. Stanisław KACHEL, prof. WAT
Instytut Techniki Lotniczej
Wydział Mechatroniki, Uzbrojenia i Lotnictwa
Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, dn. 23.12.2024 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny POBIKOWSKIEJ p.t.: „Optimization of the Transition Phase of the Aircraft in a Hybrid Configuration”

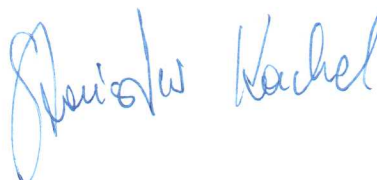
1. Podstawa opracowania

Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej nr 774/II-IM/2024 z dnia 9 października 2024 r.

2. Zakres pracy

Podjęty przez Doktorantkę problem projektowania optymalnego sterowania samolotów bezzałogowych pionowego startu i lądowania o napędzie elektrycznym z uwzględnieniem ograniczeń wpływających na jego własności lotne, energetyczne, jest zagadnieniem złożonym z punktu widzenia naukowo badawczego i niezwykle ważnym ze względów użytecznych. Wyniki badań przedstawione w rozprawie, mogą być wykorzystane przez konstruktorów, ekspertów jak i ludzi nauki, którzy próbują w swoich rozważaniach opracować najlepszą koncepcję układu aerodynamicznego samolotu zapewniającą minimalizację zużycia energii elektrycznej w procesie przejścia z zawisu w lot postępowy - czyli optymalną dla przyjętych i rozpatrywanych wielkości sterowania.

Przedstawione w rozprawie badania obejmują gruntowną analizę procesu modelowania trajektorii przejścia oraz podejścia do poszukiwania struktury aerodynamicznej z uwzględnieniem kluczowych zagadnień modelowania układów multikoptera oraz samolotów hybrydowych. W opisanym postępowaniu Autorka wykorzystuje opracowane przez siebie numeryczne modele obliczeniowe bazujące na warunkach brzegowych uzyskanych z badań doświadczalnych oraz wykorzystuje własne opracowane modele sterowania do przeprowadzenia analiz, a które pośrednio wpływają na proces optymalizacji struktury bezzałogowca realizującego cel minimalizacji zużycia energii w procesie przejścia w trajektorii lotu (zawis – ruch postępowy).



Praca liczy 250 stron i składa się z następujących elementów: streszczenia, sześciu rozdziałów, podsumowania, bibliografii, wykazu oznaczeń i skrótów oraz załącznika, który stanowi integralną część całości, przedstawionej do recenzji rozprawy.

Praca jest skoncentrowana na zagadnieniach związanych z badaniem wpływu parametrów geometrycznych określających własności aerodynamiczne modelowanych zespołów bezzałogowych statków powietrznych i ich wpływ na uzyskanie najlepszych walorów wynikających z wymagań stawianych przez mechanikę lotu z minimalizacją wydatku energetycznego na fazę przejścia. Praca obejmuje multidyscyplinarne podejście do procesu poszukiwania optymalnego rozwiązania skierowanego na udowodnienie postawionej tezy pracy to znaczy, że: „zbadanie ruchu czteropłatowego samolotu VTOL i wyprowadzenie optymalnego energetycznie układu sterowania dla fazy przejściowej samolotu między zawisem a lotem postępowym z dużą prędkością przyczyni się do poprawy jakości badanej klasy statków powietrznych”.

Rozdział pierwszy zatytułowany *Introduction* podzielono na siedem podrozdziałów, w których przedstawiono podłoże podjętych dociekań naukowych na tle pojawiających się problemów projektowania bezzałogowych statków powietrznych. W pracy Autorka zwróciła uwagę na istotę naukowego problemu, który należy rozwiązać w procesie badawczym bezzałogowego statku powietrznego (UAV) koncentrując się na autonomicznym systemie sterowania i doboru geometrii UAV, i tu Autorka rozprawy dokonała stosownego podziału rozpatrywanych problemów odnosząc się do literatury, a które należy wzbogacić o procedury optymalizacji poszukiwania rozwiązania spełniającego wymagane kryteria. W kolejnych podrozdziałach zwięzłej notatki odwołano się pośrednio do idei generującej rozwój podjętego tematu badań poprzez badania literaturowe tematów: startu i lądowania UAV, projektowania trajektorii lotu, modelowania i badania zagadnień aerodynamicznych, a które są kluczowymi obszarami badawczymi do optymalizacji prowadzącej do opracowania UAV spełniającego narzucone wymagania. Należy stwierdzić, że przeprowadzona analiza literatury została wykonana na wysokim poziomie dotykając 157 aktualnych pozycji z renomowanych lotniczych periodyków naukowych. Zamieszczone podrozdziały w rozdziale pierwszym podkreślają wagę problemu optymalizacji na etapie rozwoju ogólnie pojętego problemu naukowego. Stwierdzam, że na tle przeprowadzonych rozważań w tym rozdziale przygotowano grunt pod wyłaniającą się tezę rozprawy, która brzmi: „zbadanie ruchu czteropłatowego samolotu VTOL i wyprowadzenie optymalnego energetycznie układu

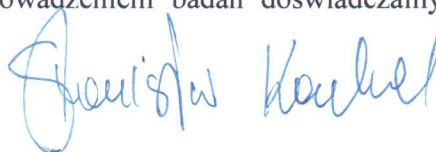
Stanisław Kuchel

sterowania dla fazy przejściowej samolotu między zawisem a lotem postępowym z dużą prędkością przyczyni się do poprawy jakości badanej klasy statków powietrznych”.

W rozdziale drugim pt. *Theoretical introduction* Autorka w jasny sposób przedstawia podstawowe idee matematycznego podejścia do procesu optymalizacji w zagadnieniach poszukiwania rozwiązania spełniającego narzucone kryteria w ustalonych ograniczeniach dla wyselekcjonowanych zmiennych optymalizacji mających decydujący wpływ na rozwiązanie zadania. Rozdział zawiera niezbędny materiał matematycznych rozważań wiążących proces optymalnego projektowania bezzałogowego statku powietrznego z uwzględnieniem jego misji. W rozdziale tym został przedstawiony ogólny schemat formułowania problemu optymalizacji oraz Autorka odniosła się bezpośrednio poprzez analizowane algorytmy do systemów wspomagających proces zdążający do otrzymania optymalnego rozwiązania w procesie sterowania obiektami VTOL, co stanowi wartość dodaną w rozpatrywanym obszarze naukowych dociekań. Należy stwierdzić, że rozdział drugi stanowi swoistego rodzaju przegląd i analizę metod stosowanych obecnie w procesach optymalizacji bezzałogowych statków powietrznych co świadczy o dużej wiedzy Autorki w rozpatrywanym obszarze badawczym.

Rozdział trzeci pt. *Mathematical model* przedstawia proces tworzenia i modyfikację modeli matematycznych do udowodnienia postawionej tezy pracy, a który jest kluczowym elementem prowadzącym do rozwiązania problemów badawczych. Istotnym elementem tego rozdziału jest przedstawienie matematycznego opisu modelowanego obiektu. Autorka w tym rozdziale poruszyła ważne problemy będące podstawą do badania zachowania się VTOL uwzględniając: parametryzację modelu, określając liczbę stopni swobody, siły aerodynamiczne oraz zespół napędowy. Przytoczone i poprawnie opisane formuły matematyczne są cennym elementem tego rozdziału. Należy wspomnieć, że aby udowodnić tezę pracy Autorka rozprawy musiała zgłębić metody: rozwiązania równań ruchu UAV komputerowego modelowania zespołów składowych statku powietrznego, modelowania aerodynamiki, transformacji układów odniesienia, badania stateczności, co niewątpliwie podkreśla warsztat analityczny w rozpatrywanym obszarze badawczym.

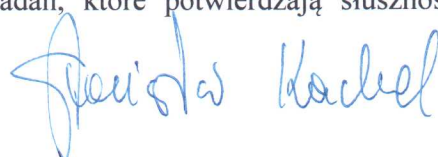
Rozdział czwarty pt. *Mathematical model of the test aircraft* przedstawia powiązania między ogólnie przyjętym procesem modelowania statku powietrznego i jest rozszerzeniem przedstawionych metod w rozdziale trzecim. Rozdział ten zawiera powiązanie pomiędzy opracowaniami teoretycznymi i przeprowadzeniem badań doświadczalnych co podkreśla



profesjonalizm w podejściu do rozwiązania zadań badawczych. W rozdziale czwartym Autorka zaprezentowała algorytm badań symulacyjnych wykorzystując system MATLAB. Opracowane algorytmy stały się niezbędnym narzędziem do naukowych dociekań na drodze poszukiwania optymalnych parametrów sterowania, które znacząco odpowiadają za jakość modelowanego statku powietrznego. Cennym elementem analizowanego rozdziału są przedstawione charakterystyki momentu pochylającego w funkcji zespołu napędowego i różnych prędkościach przejścia, co stanowi wartość dodaną w przedstawionej do recenzji rozprawy.

Rozdział piąty pt. *Multidisciplinary planform design* w całości jest poświęcony udowodnieniu tezy rozprawy doktorskiej (z dobrym skutkiem). Autorka przedstawiła problem projektowania optymalnej trajektorii obiektu VTOL. Poszukiwanie optymalnej trajektorii zostało rozpatrzone w dwóch przypadkach dla modelu o trzech stopniach swobody. Pierwszy przypadek dotyczy wyłącznie rozpatrywania równań ruchu obiektu. Drugi przypadek określa zachowanie się obiektu uwzględniając wpływ wektora zespołu napędowego. Cennym elementem tego rozdziału jest przeprowadzona analiza trajektorii obiektu przy założeniu stałej lub zmiennej wysokości. Należy zauważyć, że zaprezentowana umiejętność wykorzystania metod optymalizacji oraz przeprowadzenie algorytmizacji na potrzeby udowodnienia tezy rozprawy świadczy o dużej wiedzy Autorki z dziedziny programowania procesów do rozwiązywania problemów z dyscypliny inżynieria mechaniczna i stanowi wartość dodaną do rozwoju nauki operując na złożonych procesach optymalizacji. Autorka rozprawy wyniki analiz zestawiała w odpowiednich wykresach od 5.1, do 5.8 oraz w tabeli 5.1, które zostały poparte niezbędnymi komentarzami do otrzymanych wyników w procesie optymalizacji obiektu VTOL.

Rozdział szósty pt. *Control system design* zawiera algorytm nowego podejścia w procesie sterowania VTOL przy przejściu przez energochłonną fazę lotu. W rozdziale tym trafnie przytoczono zagadnienia linearyzacji do procesu uzyskania idealnej trajektorii lotu dla rozpatrywanego regulatora. Zagadnienia przedstawione w tym rozdziale są dobrze powiązane z procesami przedstawionymi w rozdziale czwartym i piątym. Proces ten został zaprezentowany na bazie modelu o sześciu stopniach swobody. Cennym elementem tego rozdziału są wyniki badań zachowania się obiektu i tłumienia odchyłek trajektorii przez odpowiednio dobrany (badany) regulator. Całość rozdziału podsumowują wyniki (rys.6.5 do rys.6.8 oraz tab.6.1) przeprowadzonych badań, które potwierdzają słuszność przyjętych



modeli i warunków symulacji. Przedstawione wyniki i rozważania w rozdziale szóstym w całości udowadniają tezę rozprawy.

Rozdział siódmy pt. *Summary* zawiera spostrzeżenia z przeprowadzonych badań optymalizacji fazy przejścia celem minimalizacji zużycia energii dla zapewnienia poprawnej trajektorii lotu. Opracowane wnioski z analiz mają swoją specjalną wartość pozwalającą prześledzić tok podejścia do przeprowadzonych badań związanych z optymalizacją fazy przejścia struktur hybrydowych.

3. Ocena pracy

Zasadnicza wartość recenzowanej rozprawy jest związana z umiejętnym zastosowaniem przez Autorkę rozprawy formalizmu metod optymalizacji i implementacji ich poprzez opracowanie własnych algorytmów do komputerowych systemów obliczeniowych, modelowania matematycznego oraz przeprowadzeniu badań symulacyjnych projektowania optymalnej fazy przejścia trajektorii lotu struktur hybrydowych przy uwzględnieniu minimalizacji zużycia energii. Numeryczną analizę Autorka rozprawy prowadziła w oparciu o model o sześciu stopniach swobody, który był adekwatnym modelem do przeprowadzonych rozważań. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że praca ma charakter aplikacyjny o bardzo dużym znaczeniu praktycznym. Jej walorem jest to, iż składa się z części modelowania matematycznego i obliczeniowej/symulacyjnej (zamieszczonej w rozdziałach czwartym, piątym i szóstym), które wzajemnie się uzupełniają. Doktorantka poszukiwała rozwiązań zagadnień praktycznych, o dużym znaczeniu poznawczym mającym zastosowanie w procesie poszukiwania optymalnych rozwiązań dla zapewnienia poprawnej fazy przejścia trajektorii lotu układu hybrydowego przy zapewnieniu minimum zużycia energii, co wymagało pośrednio podejścia do multidyscyplinarnej optymalizacji w procesie badania analizowanych przypadków. Prezentowane w pracy wyniki mają odpowiednie odniesienie do literatury, ale stanowią własne oryginalne podejście do udowodnienia tezy rozprawy. Stwierdzam, że praca stanowi doskonale kompendium wiedzy teoretycznej i praktycznego podejścia do rozwiązania trudnych problemów optymalizacji w zagadnieniach sterowania VTOL. Podkreślam, że przedstawiona do recenzji praca została zapisana na 250 stronach i stanowi to tylko skrót z ogromu pracy jaką Autorka musiała włożyć aby powstała aplikacyjnie tak dobra metoda wspomagająca proces projektowania VTOL uwzględniając niewralgiczne fazy przejścia i zawiera efektywne rozwiązanie ważnego zagadnienia naukowego. Istotną cechą pracy jest fakt, że może być wykorzystana w niektórych obszarach nauki np. w procesie projektowania, w procesie syntezy bryły aerodynamicznej z doбором zespołów napędowych, źródeł energii

Janusz Korabel

oraz w zagadnieniach mechaniki lotu. Warto wspomnieć, że przeprowadzone symulacje i uzyskane wyniki w pełni podkreślają fakt, że została opracowana metoda optymalizacji fazy przejścia struktur VTOL o napędzie elektrycznym. Autorka rozprawy rozwiązała postawione zagadnienie stosując własne algorytmy i metody obliczeniowe oraz zastosowała aparat matematyczny odpowiadający współczesnym pracom doktorskim. Należy podkreślić, że zastosowanie współczesnych technik symulacyjnych do badania procesów przejścia w fazach lotu VTOL wskazują na duże umiejętności Autorki rozprawy w zakresie optymalizacji procesów transonicznych fazy lotu pionowego w postępowy obiektów bezzałogowych.

Wyniki pracy są wartościowe z punktu widzenia zastosowań badawczych (naukowych), inżynierskich w procesach projektowania oraz dalekosiężnych analiz lotniczych konstrukcji cienkościennych.

Uwag krytycznych w rozprawie nie stwierdziłem.

4. Wnioski

Rozprawa napisana jest bardzo starannie i czytelnie oraz wskazuje na duży zasób wiedzy i doświadczenie Autorki w zakresie: teorii optymalizacji, modelowania matematycznego, symulacji komputerowych. Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr. inż. Katarzyny POBIKOWSKIEJ w zakresie optymalizacji zużycia energii w fazie przejścia trajektorii lotu struktur VTOL, recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko. Praca zasługuje na wyróżnienie. Uzasadnienie wyróżnienia pracy zawarte jest powyżej w treści recenzji.

Stwierdzam, że praca spełnia wymagania stawiane przez ustawę z dnia 20. lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” i jest mocno osadzona w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna i rekomenduję ją do publicznej obrony.

