

Dr hab. inż. Cezary SZCZEPAŃSKI
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa
Profesor

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny
POBIKROWSKIEJ**

**p.t. „OPTIMIZATION OF THE TRANSITION PHASE OF THE
AIRCRAFT IN A HYVRID CONFIGURATION”**

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Katarzyny Pobikrowskiej pod tytułem „Optimization of the Transition Phase of the Aircraft in a Hybrid Configuration” została wykonana na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 14.10.2024.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa zawiera siedem rozdziałów, streszczenia, wykaz literatury, skrótów i akronimów oraz dodatek. Przedstawiona została na 250 stronach, z czego 211 stron to treść części zasadniczej rozprawy. Wykaz zacytowanej literatury liczy 157 pozycji.

W początkowym, rozdziale zatytułowanym „Introduction”, Autorka przedstawiła genezę badanego problemu, opisała cel pracy, typy obiektów sterowania – bezzałogowych statków powietrznych UAV typu Vertical Take-Off and Landing (VTOL), krótko zarysowała zagadnienie wyznaczania toru lotu i dokonała przeglądu metod i narzędzi programowych syntezy układów sterowania optymalnego. Celem pracy jest badanie ruchu statku powietrznego VTOL z czterema wirnikami pionowymi podczas przejścia z zawisu do lotu poziomego oraz synteza realizującego ten manewr układu sterowania optymalnego pod względem energetycznym. Następnie, przedstawiła skondensowaną analizę bieżącego stanu wiedzy w obszarze objętym jej pracą w

zakresach: modelowania aerodynamiki, optymalizacji trajektorii lotu i sterowania optymalnego lotem wraz z zastosowaniem omówionych zagadnień do hybrydowych UAV w układzie stałopłata z czterema wirnikami pionowymi. Rozdział kończy krótki opis dostępnych na rynku autopilotów dla UAV oraz omówienie zawartości pracy.

W treści rozdziału pojawiły się niejasne sformułowania w kontekście ich użycia. Są to na stronie 16 „control policy” a w dalszej części „single control policy”. Ponadto, na stronach 27 i 75 Autorka używa niepoprawnego pojęcia „most optimal”. Słowo „optimal” w układach sterowania znaczy najlepszy w danych warunkach, więc dodanie tu „most” jest niewłaściwe.

Rozdział 2 zatytułowany „Theoretical introduction” Autorka poświęca opisowi zagadnień i koncepcji teoretycznych wykorzystywanych w rozprawie. Znajdują się tu opisy: metod numerycznych rozwiązywania zwyczajnych równań różniczkowych, układów liniowych opisanych tymi równaniami, ich właściwości takich, jak obserwowalność i sterowalność oraz analizy stabilności wielowymiarowych układów liniowych. W dalszej części Autorka przedstawia koncepcje związane ze sterowaniem optymalnym. Obszernie omawia podstawy teoretyczne optymalizacji z ograniczeniami, a także metody Newtona. Pozostałą część rozdziału wypełnia przedstawienie podstaw teorii sterowania optymalnego, teorii sterowania oraz teorii śmigłowych napędów pionowzłotów z elementami dotyczącymi UAVów.

W początkowej części rozdziału pojawiło się szereg stwierdzeń nie wyjaśnionych do końca i niezbyt zrozumiałych. Na stronie 49 mamy: „solving dynamical systems”, „ way to solving the objective”, „implementation of the control policy in the real flying object”, które to sformułowania nie znalazły swojego precyzyjnego wyjaśnienia. Na stronie 54 4 wiersz od góry prawdopodobnie zamiast drugiego „to” powinno być „too” co jest istotne dla sensu tego zdania. Na stronie 82 pojawia się „the optimal control sequence or policy” nie wyjaśnione w dalszej części. Przedstawienie podstaw teoretycznych obejmuje 52 strony i mogłoby być znacznie krótsze, bez uszczerbku dla zawartości.

W rozdziale tym Autorka przedstawia także przyjęte przez siebie metody i koncepcje, w tym bardzo dobre podejście do modelu obiektu sterowania i samego układu sterowania bazujące na układzie liniowym o parametrach zmiennych w czasie jako przybliżeniu układu nieliniowego jakim jest badany obiekt.

Rozdział 3, zgodnie ze swoim tytułem „Mathematical model”, zawiera model matematyczny badanego obiektu – bezzałogowego stałopłatu VTOL w układzie z

pionowymi wirnikami. W pracy przyjęto, jest to ciało sztywne o sześciu stopniach swobody ze sztywnymi wirnikami na pokładzie. Uwzględniono tu oddziaływania aerodynamiczne wyznaczone poprzez obliczenia CFD i badania w tunelu aerodynamicznym, zaś siły i momenty pochodzące od napędu poziomego zamodelowano jako układy liniowe pierwszego rzędu.

W dalszej części przedstawiono przyjęte układy odniesienia, szczegółowe przeliczenia z jednego układu do drugiego, równania kinematyczne dla ruchów postępowych i obrotowych oraz zależności opisujące siły i momenty oddziałujące na badany obiekt.

Kolejna część rozdziału poświęcona została opisowi środowiska symulacyjnego, w którym prowadzono badania. Było to środowisko Matlab Simulink z Flight Dynamics and Control Toolbox z modułami stworzonymi przez Autorkę. Przedstawiła także warunki równowagi dla poszczególnych faz lotu od zawisu do lotu poziomego z prędkością powyżej prędkości przeciągnięcia statycznego oraz przyjęty sposób linearyzacji równań ruchu UAV. Rozdział kończy krótkie przedstawienie równań przyjętych do symulacji, opisujących siły od poszczególnych wirników oraz energię zużytą do wykonania przejścia od zawisu do lotu poziomego.

W rozdziale tym pojawiły się pewne niejasności. Na stronie 103 pojawił się termin „control mateirals” bez dalszego jego wyjaśnienia. Ponadto przyjęto (strona 115) że dodatnie wychylenia powierzchni sterowych powodują ujemne ruchy kątowe sterowanego UAV. Z reguły mamy do czynienia ze zgodnością tych znaków. Skąd takie założenie? Na stronie 117 mamy odwołanie do rysunku, ale nie podano którego.

Rozdział 4 „Mathematical model of the test aircraft” poświęcony jest opisowi modelu fizycznego i matematycznego badanego obiektu sterowania, którym jest UAV – samolot w układzie hybrydowym, z czterema podwójnymi wirnikami pionowymi i jednym pchającym. Do sterowania lotem wykorzystuje typowe samolotowe powierzchnie sterowe: stery wysokości i kierunku oraz lotki. Podano tu szczegółowe charakterystyki aerodynamiczne przyjęte do badań. Uzyskano je podczas badań tunelowych belki z napędami oraz poprzez modelowanie CFD.

Rozdział ten zawiera także szczegółowe modele napędów pionowego i poziomego, wraz z ich przyjętymi charakterystykami dynamicznymi. Przeprowadzono tu dokładną analizę uproszczeń modeli zjawisk aerodynamicznych przyjętych w pracy oraz metod wyznaczania parametrów badań symulacyjnych lotu w stanie przejściowym.

Kolejnym zagadnieniem przeanalizowanym w tym rozdziale jest wyznaczanie warunków równowagi badanego samolotu dla wyznaczonych trajektorii. Zagadnienie to ma istotne znaczenie biorąc pod uwagę metodykę badań i syntezy układu sterowania lotem tego obiektu. Jest ono bardzo dobrze opracowane i przeanalizowane przez Autorkę.

Rozdział kończy opis problemów i sposobów ich rozwiązania podczas implementacji opracowanych modeli w środowisku Matlab/Simulink.

Rozdział 5 zatytułowany „Energy-optimal transition trajectory” zawiera sformułowanie problemu optymalizacyjnego. Autorka słusznie przyjęła, że zmniejszenie zużycia energii podczas lotu w fazie przejściowej istotnie wpłynie na długotrwałość całego lotu. Założenie, że optymalizacja tego parametru jest więc najważniejszym czynnikiem wpływającym na praktyczne wykorzystanie wyników pracy jest słuszne.

W rozdziale opisano szczegółowo założenia i sposób wyznaczania trajektorii lotu dla modelu ruchu samolotu o trzech stopniach swobody, z dynamicznymi ograniczeniami. Ograniczenie modelu do trzech stopni swobody zostało obszernie i poprawnie wyjaśnione wraz z korzyściami z tego wynikającymi.

Do wyznaczenia trajektorii Autorka wykorzystwała pakiet do syntezy układów sterowania optymalnego ICLOCS2 z nieliniowym solverem optymalizującym IPOPT. W procesie dyskretyzacji trajektorii zastosowała metodę Hermite-Simpsona, oferującą najwyższy stopień wielomianu rozmieszczającego punkty dyskretyzacji. Autorka przeprowadziła tu badania szeregu przypadków, z których do dalszych badań wybrała cztery. W tym jest jeden przyjęty jako odniesienie przypadek pionowego wznoszenia a następnie przejście do lotu poziomego bez pochylenia samolotu.

Rozdział kończy porównanie uzyskanych wyników badań symulacyjnych trajektorii z ograniczeniami dotyczącymi wysokości lotu oraz bez takich ograniczeń. Pokazano tu uzyskane czasy lotu w fazie przejściowej, przeleciany dystans, zużyta energia i jej porównanie do energii potrzebnej do wykonania lotu odniesienia. Uzyskane wyniki posłużyły Autorce do sformułowania wielu cennych wniosków związanych z celem pracy.

W rozdziale 6 zatytułowanym „Control system design” Autorka przedstawia syntezę optymalnego układu sterowania, który będzie realizował wpisaną off-line trajektorię lotu w fazie przejściowej. Do tego celu wybrała metodę sterowania LQR (Linear Quadratic Regulator) dla modelu sterowanego obiektu o sześciu stopniach

swobody. Ten nieliniowy model był linearyzowany dla poszczególnych punktów trajektorii, ze względu na zmiany jego parametrów w każdym z tych punktów. Autorka przedstawiła szczegółowo przyjęte założenia, uproszczenia oraz właściwości dynamiczne badanego systemu.

Dalszą część rozdziału stanowią zintegrowane wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych syntezy optymalnego układu sterowania realizującego loty po trajektorii najlepszej z punktu widzenia zużytej energii. Uzyskano znacznie krótszy czas realizacji lotu w fazie przejściowej chociaż zostało to okupione nieco większym zużyciem energii spowodowanym nieco innym działaniem silników pionowych oraz włączeniem sterowania w kanale bocznym. Rozdział kończy szczegółowa analiza uzyskanych wyników badań symulacyjnych.

Ostatni, 7 rozdział „Summary” zawiera zgodnie ze swoim tytułem podsumowanie przyczyn podjęcia tematu, przyjętych metod badawczych, wyników uzyskanych podczas całej pracy potwierdzających założony cel pracy oraz propozycję przyszłych prac, wynikających z przeprowadzonych badań.

W tym miejscu podsumowując zawartość merytoryczną, należy stwierdzić, że Autorka przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego syntezy optymalnego układu sterowania hybrydowym UAV w fazie przejściowej. Tym samym zrealizowała w pełni zaplanowane badania osiągając zakładane cele naukowe oraz wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Pod względem redaktorskim, praca została napisana starannie chociaż Autorka nie uniknęła drobnych błędów gramatycznych i edytorskich. Początkowa część pracy (Rozdziały 2 i 3) bardzo obszernie przedstawia podstawowe informacje o metodach sterowania, przyjmowanych układach odniesienia, przeliczeniach pomiędzy tymi układami itp. Można by ją skrócić co najmniej o połowę bez szkody dla merytorycznej wartości całej pracy.

Podsumowując, oceniam poziom pracy jako spełniający w całym zakresie wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi. Autorka w pełni wykazała się umiejętnością formułowania celu naukowego badań, znajomości metodyki prowadzenia badań naukowych oraz zdolnością do wyciągania wniosków, popartą

znajomością ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie objętej przedstawioną rozprawą. Tematyka pracy wchodzi w zakres dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Autorki do publicznej obrony przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej.



Dr hab. inż. Cezary Szczepański
Profesor Łukasiewicz – Instytut Lotnictwa
Warszawa, 28.02.2025