

Kraków 20.01.2024

Dr hab. inż. Krzysztof Kołodziejczyk, prof. AGH

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

Akademia Górniczo-Hutnicza

im. Stanisława Staszica w Krakowie

Al. A. Mickiewicza 30

30-059 Kraków

e-mail: krkolodz@agh.edu.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

The Method of Increasing the Flight Endurance of Vertical Take-Off
and Landing Unmanned Aerial Vehicle

autor rozprawy: mgr inż. Krzysztof Mateja

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej z dnia 25 października 2023 r. w sprawie powołania recenzentów rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Matei oraz pismo Prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak, Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej, z dnia 26 października 2023 r. dotyczące wykonania recenzji przedmiotowej rozprawy.

Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. PŚ.

2. Wprowadzenie

Obszarem nauki zadeklarowanym przez Doktoranta jest dziedzina nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Podjęta w pracy tematyka dotyczy bardzo dynamicznie rozwijającego się obszaru maszyn lotniczych jakim są bezzałogowe statki powietrzne

(BSP). Podjęte przez Doktoranta prace i badania dotyczyły stałopłatów, w szczególności rozwiązania konstrukcyjnego pionowego startu i lądowania (VTOL – Vertical Take-Off and Landing). Bardzo istotnymi parametrami w praktycznym wykorzystaniu BSP jest możliwy do osiągnięcia czas trwania i zasięg lotu. Zwiększenie długotrwałości lotu czyli czasu nieprzerwanego lotu statku powietrznego przemieszczającego się bez konieczności lądowania w celu uzupełniania zasobów energii stanowi zagadnienie badawcze i problem naukowy, którego próbę opracowania podjął się Doktorant.

Celem postawionym w rozprawie było *opracowanie metody pozwalającej na wydłużenie czasu lotu bezzałogowego statku powietrznego pionowego startu i lądowania. Ze względu na swoją uniwersalność metoda powinna mieć zastosowanie do różnych typów bezzałogowych statków powietrznych, w tym m.in. stałopłatów klasy HALE, LALE oraz innych typów BSP.*

W pracy została również sformułowana teza brzmiąca: *Metoda oparta na modelowaniu Model-Based-Design (MBD) pozwala na projektowanie VTOL BSP o znacznie zwiększonej długotrwałości lotu.*

Podjęta tematyka z całą pewnością jest aktualna i praktycznie użyteczna, z bardzo dużym potencjałem praktycznego wykorzystania. O istotności zagadnienia podjętego przez doktoranta świadczy bardzo duża liczba ukazujących się publikacji naukowych powiązanych z tematyką pracy, jak również realizowane w różnych ośrodkach naukowych prace badawcze z zakresu bezzałogowych statków powietrznych w tym rozwiązań z zasilaniem wspomaganym panelami fotowoltaicznymi. Dodatkowym elementem wpływającym na aktualność poruszanych przez Doktoranta zagadnień jest bardzo istotne znaczenie tego typu konstrukcji w aktualnie trwających konfliktach zbrojnych.

3. Charakterystyka rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa napisana jest w j. angielskim i obejmuje 123 strony. Praca składa się z 9 rozdziałów poprzedzonych wykazem symboli i akronimów. Zamieszczony na końcu pracy wykaz literatury zawiera 152 pozycje w tym 4 pozycje w których współautorem jest Doktorant. W pracy zamieszczono streszczenie zarówno w j. polskim jak i j. angielskim. Praca zawiera 94 rysunki oraz 29 tabel numerowanych wewnątrz w obrębie każdego rozdziału. Praca napisana jest językiem poprawnym, od strony edytorskiej bez większych zastrzeżeń.

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do zagadnień poruszanych w rozprawie doktorskiej, wraz z przeglądem aktualnego stanu wiedzy. W rozdziale tym został sformułowany, wymieniony wcześniej, cel i zakres pracy jak również został opisany problem badawczy, którego rozwiązania podjął się Autor pracy. W rozdziale tym podana została również informacja o publikacjach oraz pracach badawczych, w ramach których realizowane były badania i prace z zakresu przedstawionej pracy doktorskiej.

W drugim rozdziale, zgodnie z jego tytułem, w oparciu o przegląd literatury, została wykonana analiza stanu wiedzy w zakresie układów zasilania bezzałogowych statków powietrznych energią słoneczną, pozyskiwania energii z wykorzystaniem paneli fotowoltaicznych, metod łączenia paneli fotowoltaicznych z powierzchnią statków powietrznych jak również magazynowaniem pozyskanej energii elektrycznej.

Rozdział trzeci zatytułowany *Metody* zawiera informacje na temat przyjęcia pakietu oprogramowania MATLAB/Simulink jako środowiska do tworzenia modelu symulacyjnego oraz modeli elementów składowych bezzałogowego statku powietrznego, w tym metod i narzędzi wykorzystanych do jego utworzenia. W rozdziale tym został omówiony system zarządzania energią w BSP zasilanych z wykorzystaniem paneli fotowoltaicznych, przedstawiony został model natężenia promieniowania, podana została informacja na temat rodzaju oraz parametrów przyjętego w modelu symulacyjnym panelu fotowoltaicznego, jak również została podana

informacja o wykorzystanych bibliotekach modelu magazynu energii oraz kontrolera MPPT. W rozdziale tym została podana również informacje o zastosowanych uproszczeniach i ograniczeniach modeli wykorzystanych w dalszej części pracy.

W rozdziale czwartym zaprezentowane zostały wyniki testów działania modeli: natężenia promieniowania, paneli fotowoltaicznych oraz magazynu energii.

Rozdziale piątym została przeprowadzona analiza zużycia energii dla trzech rozwiązań konstrukcyjnych BSP: dla dwóch modeli typu „Twin Stratos” klasy LALE (Low-Altitude Long-Endurance) i HALE (High-Altitude Long-Endurance) – konstrukcji dwukadłubowych z dwoma silnikami, oraz dla rozwiązania konstrukcyjnego VTOL typu „Tail Sitter” – konstrukcji pionowego startu. Dla każdego rozwiązania konstrukcyjnego, zostało wyznaczone zużycie energii dla uproszczonego indywidualnego planu lotu. Jednocześnie została wyliczona możliwa do pozyskania energia z zamontowanych na BSP paneli fotowoltaicznych. Obliczone wartości posłużyły do wykonania bilansu energetycznego dla analizowanych rozwiązań.

W rozdziale szóstym zatytułowanym *Dostrajanie modeli symulacyjnych* w pierwszym punkcie dla każdej z konstrukcji został zaproponowany indywidualny scenariusz lotu z określonymi kamieniami milowymi, którymi było uzyskanie określonej dla danego planu lotu wysokości, oraz uzyskanie minimum 24 godzinnego czasu lotu. W pozostałych punktach zostały zamieszczone wyniki badań i testów stanowiskowych poszczególnych komponentów BSP. Badania były realizowane w celu pozyskania danych do modelu symulacyjnego i ustawienia parametrów poszczególnych modułów. Badania zostały przeprowadzone dla panelu fotowoltaicznego zarówno bez jak i z naklejonym laminatem, dla których zostały wyznaczone charakterystyki I-V oraz P-V. Analizie został poddany układ magazynowania energii, dla którego została wyznaczona konfiguracja, wymagana pojemność oraz

charakterystyka prądowa. Przeprowadzony został dobór parametrów magazynu energii wykonany na podstawie bilansu energetycznego statku powietrznego z uwzględnieniem przyjętych planów lotu. W bilansie oprócz magazynu energii ujęto również układy wymagające zasilania jak i energię pozyskaną z paneli fotowoltaicznych.

Rozdział siódmy zawiera wyniki symulacji numerycznych lotu dla modelowanych BSP zarówno dla zdefiniowanych w rozdziale 6 planów lotu, jak i zmodyfikowanych planach lotu. Modyfikacje planów lotu zostały wykonane pod kątem możliwości wydłużenia czasu trwania lotu. Na bazie uzyskanego wyniku została przeprowadzona analiza bilansu energetycznego, na który składały się energia z magazynu energii, energia z paneli fotowoltaicznych oraz energia zużywana na potrzeby lotu.

Rozdział ósmy zawiera opis prac mających na celu zweryfikowanie poprawności zdefiniowanego modelu symulacyjnego. Został zbudowany prototyp wyposażony w moduły o parametrach dobranych w trakcie tworzenia modelu symulacyjnego. Została przeprowadzona weryfikacja poprawności działania: układu zasilania (akumulatorów wraz z systemem zarządzającym), przetwornicy MPPT, ogniw fotowoltaicznych. Zostały przeprowadzone również testy poprawności działania całego systemu zasilania zamontowanego na BSP w różnych warunkach atmosferycznych.

Ostatni, dziewiąty rozdział zawiera podsumowanie przeprowadzonych prac, wnioski oraz informację na temat dalszych prac.

4. Ocena merytoryczna

Tytuł pracy, który na język polski możemy przetłumaczyć jako „*Metoda zwiększenia długotrwałości lotu bezzałogowego statku powietrznego pionowego startu i lądowania*”, Doktorant w celu pracy rozszerza na inne konstrukcje bezzałogowych statków powietrznych, nie ograniczając się tylko do statków powietrznych pionowego startu i lądowania. W literaturze przedmiotowej możemy znaleźć szereg opublikowanych prac dotyczących

badan nad długotrwałością lotu bezzałogowych statków powietrznych, natomiast podjęcie tematu w zakresie bezzałogowego statku powietrznego pionowego startu i lądowania stanowi element oryginalności recenzowanej pracy. Doktorant opracował model symulacyjny umożliwiające prowadzenie symulacji lotu bezzałogowego statku powietrznego dla różnych typów stałopłatów jak i rozwiązania BSP pionowego startu i lądowania.

Opracowane narzędzie (model symulacyjny) umożliwia prowadzenie symulacji lotu dla różnych scenariuszy. W wyniku symulacji generowane są dane pozwalające na prowadzenie bilansu energetycznego BSP rozpoczynając od startu przez kolejne etapy lotu. Opracowany przez Doktoranta model symulacyjny umożliwia prowadzenie analiz porównawczych dla różnych planów lotu, co jednocześnie daje możliwość poszukiwania rozwiązania zwiększającego długotrwałości lotu np. dla BSP VTOL. Zrealizowane prace pozwalają na stwierdzenie, że postawiony przez Doktoranta cel rozprawy, którym było opracowanie metody pozwalającej na wydłużenie czasu lotu bezzałogowego statku powietrznego, również dla konstrukcji pionowego startu i lądowania, został zrealizowany.

Postawiona w pracy teza o możliwości projektowania VTOL BSP o znacznie zwiększonej długotrwałości lotu wykorzystując modelowanie Model-Based-Design (MBD) – biorąc pod uwagę fakt utworzenia w pakiecie MATLAB/Simulink działającego modelu symulacyjnego – można stwierdzić że teza została potwierdzona.

Doktorant realizując pracę wykazał się umiejętnością rozwiązania złożonego zagadnienia naukowego, które wymagało zaplanowania i przeprowadzenia szeregu działań: utworzony został model symulacyjny w środowisku Simulink, zdefiniowane zostały poszczególne komponenty utworzonego modelu, zdefiniowane zostały parametry niezbędne do ich funkcjonowania, zostało przeprowadzone dostrojenie modeli. Realizowane prace wymagały przeprowadzenia badań i pomiarów laboratoryjnych.

Korzystając z utworzonego modelu symulacyjnego Doktorant przeprowadził symulacje lotów, a następnie wykonał analizę uzyskanych

wyników, przeprowadził interpretacje przebiegów zmian mocy oraz poprawnie wyciągał wnioski.

W celu potwierdzenia poprawnego działania modelu symulacyjnego Doktorant zbudował prototyp wybranej konfiguracji BSP, a następnie przeprowadził weryfikację funkcjonowania poszczególnych komponentów. Tym samym potwierdził umiejętność zaplanowania eksperymentu, przeprowadzenia analizy i wyciągania wniosków, jak również prowadzenia badań laboratoryjnych.

Biorąc pod uwagę układ pracy jej finalnym elementem miały być testy przeprowadzone w warunkach rzeczywistych na zbudowanym prototypie. Testy których nie udało się zrealizować, a które pozwoliłyby na ocenę poziomu zgodności utworzonego i testowanego modelu symulacyjnego BSP z obiektem rzeczywistym. Tak jak Autor podaje w planowanych przyszłych działaniach, dopiero wykonanie lotów testowych prototypu w warunkach rzeczywistych może potwierdzić poprawność zbudowanego modelu symulacyjnego, poprawność przyjętych założeń oraz istotność wprowadzonych uproszczeń. Nie zmienia to faktu iż treść rozprawy jest zgodna z jej tematem. Kolejne rozdziały tworzą spójny i logiczny układ właściwy dla rozprawy naukowej. Autor osiągnął zamierzony cel, całość pracy stanowi wartościowe opracowanie, posiadające walory użyteczne.

Na pokreślenie zasługuje fakt iż zrealizowana praca jest pracą interdyscyplinarną, wykraczającą poza obszar inżynierii mechanicznej, poruszane są w niej zagadnienia zarówno z zakresu energii odnawialnej, lotnictwa, jak i elektroniki, automatyki i informatyki. Doktorant wykazał się dobrą znajomością zagadnień z kilku obszarów techniki, wykazał się znajomością technik doświadczalnych oraz zaawansowanych narzędzi modelowania komputerowego, jak również umiejętnością połączenia wiedzy teoretycznej, z praktycznym jej zastosowaniem co potwierdził zbudowanym prototypem.

Pracę oceniam pozytywnie; dostrzeżone usterki i uwagi zamieszczone poniżej na ogół mają charakter dyskusyjny.

5. Uwagi krytyczne

Uwagi ogólne o charakterze dyskusyjnym:

- W przedstawionej pracy Autor we wstępie podał informację, że opracowanie powstało na podstawie trzech publikacji, których Doktorant jest współautorem, co potwierdzają liczne autocytowania. Praca doktorska jest opracowaniem autorskim, co w konsekwencji nasuwa pytanie, które elementy prezentowane w pracy doktorskiej są autorskim osiągnięciem Doktoranta, a które efektem współpracy w większym zespole.
- W rozdziale 3 została podana informacja o wykorzystaniu pakietu oprogramowania MATLAB/Simulink do utworzenia modelu symulacyjnego, który obejmuje zarówno kod źródłowy, jak i gotowe biblioteki blokowe, które reprezentują modele matematyczne i komponenty modelowanego BSP. Niestety w żadnym miejscu w pracy Autor nie zamieścił utworzonego w środowisku Simulink projektu, który przedstawiałby jego budowę, elementy składowe, utworzone połączenia itd., a jedynie schemat blokowy podany na rysunku 3.4, dodatkowo jako pozycja auto-cytowana. Jednocześnie wielokrotnie w treści pracy mamy przywołany model symulacyjny, który stanowi podstawowy element opracowania.
- Na wykresie 7.16 dla symulacji „Twin Stratos 12” (scenariusz lotu na wysokość 20 km w trakcie przesilenia letniego) w drugiej dobie symulacji zgodnie z wykresem od ok. 36 godziny lotu zapotrzebowanie na moc utrzymuje się na poziomie 800-900 W i przewyższa moc paneli fotowoltaicznych – z czego wynika utrzymywanie się naładowania baterii na poziomie 100% przy jednoczesnym deficycie ilości energii dostarczanej przez PV. Należy tutaj podkreślić że w opisywanym czasie lotu BSP znajduje się w trakcie wznoszenia, jak zakładam wykorzystując maksymalnie dostępną moc układu napędowego.

- Biorąc pod uwagę cel pracy jakim jest utworzenie modelu symulacyjnego statku powietrznego pozwalającego na optymalizację parametrów lotu w celu wydłużenia czasu i długości lotu, kluczowym elementem wydaje się być precyzyjne obliczenie zużycia energii, podanie jakie składowe, w jaki sposób i w jakim zakresie zostały uwzględnione. Opisane w rozdziale 5 wyznaczenie zużycia energii nie pozwala czytelnikowi na uzyskanie takich informacji. Odnosnie szczegółów obliczenia zużycia energii przez BSP czytelnik odsyłany jest do literatury, w efekcie w pracy brak informacji dotyczących szczegółów przeliczenia wartości prezentowanych w tabelach 5.2; 5.3, 5.4.
- Nawiązując do poprzedniego pytania, czy w projekcie uwzględniono zmianę zapotrzebowania na energię wynikającą z warunków atmosferycznych takich jak zachmurzenie, wiatr, opady atmosferyczne ale również temperatura otoczenia? Czy model symulacyjny zakłada działanie BSP tylko w określonych warunkach pogodowych.
- W pracy na str. 31 podana jest informacja o wykorzystaniu biblioteki Simulinka o nazwie Generic Battery Model, nie podając żadnych informacji o wymaganych parametrach, danych wejściowych wprowadzanych do modelu baterii, danych wyjściowych uzyskiwanych, powiązaniu biblioteki z pozostałymi komponentami tworzonego modelu symulacyjnego.
- W rozdziale 6.1 przyjęto plany lotu, podano założenia jak również ich przebieg przedstawiony na rysunkach 6.1 i 6.2, natomiast nie podano zależności na podstawie której wykreślony został dokładny przebieg krzywej.
- Zamieszczenie dwóch różnych zmiennych (wielkości różnych typów) na jednej osi wykresu utrudnia jego interpretację, m.in. sugerując że wartości różnych wielkości pozostają ze sobą w korelacji. Sytuacja taka ma miejsce np. na rysunkach od 7.1 do 7.7. Znacznie lepszym

rozwiązaniem jest wprowadzenie osi dodatkowej dla wielkości różnego typu np. jak na rysunku 7.9.

Uwagi szczegółowe:

- Str. 30. Rysunek 3.7 – prezentowany wykres nie niesie żadnej praktycznej informacji, którą można by było odczytać z tego wykresu.
- W pkt. 3.5.1 Autor podaje informację o kątach: ustawienia paneli β oraz azymucie γ_S podając na rysunku 3.9 schematycznie informację odnoszącą się tylko do jednego z nich.
- Rysunki 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 nie posiadają informacji o źródle danych – czy przedstawione charakterystyki są wynikiem pomiarów realizowanych przez Autora? Bark osi dla natężenia prądu.
- W tabeli 5.1 – dla Maximum Take-off Weight (MTOW) podano wartość bez jednostki.
- Rysunki 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.8, 5.9 – brak informacji o źródle danych prezentowanych na wykresie, bądź zależności na podstawie której zostały wykreślone.
- Na rys. 6.5, 6.6, 6.9, 6.10 – przedstawiono charakterystykę składającą się z nałożonych na siebie szeregu krzywych bez informacji na wykresie opisujących przestawiony pęk krzywych.

6. Wnioski końcowe

Podjęcie tematu badawczego rozprawy doktorskiej uważam za celowe i prawidłowo uzasadnione. Doktorant posiada odpowiednie przygotowanie dla rozwiązywania postawionych problemów naukowych, co wykazał w przedmiotowej rozprawie. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością prowadzenia pracy naukowej. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego opracowania metody pozwalającej na wydłużenie czasu lotu bezzałogowego statku powietrznego pionowego startu i lądowania.

Rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Matei wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna zarówno w aspekcie naukowym, jak i utylitarnym.

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Matei pt. „The Method of Increasing the Flight Endurance of Vertical Take-Off and Landing Unmanned Aerial Vehicle” przygotowana pod opieką promotora - dr hab. inż. Wojciecha Skarki, prof. PŚ, spełnia wszystkie warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r., poz. 1668 ze zm.). W związku z powyższym wnoszę o przyjęcie recenzowanej rozprawy doktorskiej przez Radę Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Krzysztof Kołodziejczyk, prof. AGH

/podpis odręczny/

*wyłączenie jawności w zakresie danych osobowych oraz ochrony prywatności osoby fizycznej na podstawie art. 5 ust. 2 ustawy z dnia 6 września 2001 r. o dostępie do informacji publicznej (tj. Dz.U. z 2016 r., poz. 1764)