

Prof. dr hab. inż. Stanisław Radkowski  
Instytut Pojazdów i Maszyn Roboczych  
Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych  
Politechniki Warszawskiej

Warszawa, 18.01.2024r

## RECENZJA

### Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Matei pt.

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

#### 1. Uwagi o sformułowanym zadaniu

Badania dynamiki obiektów latających mają długą historię. Przedstawione w pracy modelowania i budowy wielowirnikowców w układzie niekoaksjalnym – z wirnikami na osobnych osiach, rozmieszczone z dala od siebie – zaczęto prawdopodobnie podejmować we Francji w pierwszej dekadzie XX wieku. Wówczas wielowirnikowce miały jedną, ale znaczącą wadę: były niestabilne i niewiele dało się z tym zrobić, mimo to ówczesnym pilotom udawało się tego dokonywać. Niestety cała uwaga i siły pilota skoncentrowane były na stabilizowaniu maszyny. Z tego względu przerywano wiele projektów. Obecnie stosowane rozwiązania pozwalają wreszcie na zmniejszenie kosztów elektroniki, tworzenie kontrolerów lotów sterujących jednocześnie czterema lub większą liczbą śmigieł oraz miniaturyzację maszyn, co stanowi, że dziś wielowirnikowce stanowią najpopularniejszą grupę, nie tylko wśród dronów cywilnych. Stosowane są coraz to lepsze materiały konstrukcyjne, lżejsze i bardziej wytrzymałe, a na przestrzeni kilku ostatnich lat dokonał się ogromny skok w dziedzinie napędów bezzałogowców: produkuje się silniki o większej sprawności, baterie czy ogniwa paliwowe o coraz lepszych parametrach. W ciągu kilku najbliższych latach spodziewać się możemy dalszej minimalizacji masy, zwiększenia długotrwałości i bezpieczeństwa lotu, co w konsekwencji będzie prowadzić do dalszego poszerzania spektrum zastosowań. Takim przykładem jest rozwój dronów pionowego startu i lądowania i ich kolejne zastosowanie w akcjach ratowania ludzi w przypadkach gwałtownego zatrzymania

Biurowisko Dziekana

wpłynęło dnia 19.01.2024  
RDJMc/2015/112024  
nr ..... zał. ....

akcji serca- użycie takich dronów w odpowiednio zaprojektowanym autonomicznym systemie ,stwarza szansę na dostarczenie defibrylatora w ciągu wymaganych czterech minut. Każdy z powyższych samolotów zbudowany jest w oparciu o lekki kompozyt , energooszczędny układ napędowy i jest wyposażony w fotowoltaiczne (PV) panele w postaci umożliwiającej produkcję energii podczas lotu. Energia jest następnie wykorzystywana przez układy napędowe i awionika lub przechowywane w akumulatorach.

Wspomniany rozwój nierozzerwanie wiąże się zastosowaniem metod komputerowo wspartego projektowania,co przedstawiono w pracy odwołując się do MBD ,Modelowo Wspartego Projektowania. Jest to przykład wykorzystywania komputerowego modelowania matematycznego w projektowaniu, analizowaniu i walidacji systemów dynamicznych. Postępowanie obejmuje wdrożenie produktu od wczesnej koncepcji projektu do końcowej walidacji i testów weryfikacyjnych,w tym zachowania funkcjonalne oraz optymalizację kosztów w funkcji wydajności systemu. Wspomniane problemy znajdują swoje odzwierciedlenie w recenzowanej rozprawie doktorskiej, a zostały ujęte w aspekcie badań i analiz układów mechatronicznych, stosowanych w omawianym zakresie.

*Mając na uwadze obecny stan wiedzy w tym zakresie należy uznać, że cele rozprawy sformułowane przez Autora są poprawne, a tematyka pracy ma duże znaczenie naukowo-poznawcze i aplikacyjne.*

## **2. Charakterystyka pracy**

Opiniowana praca składa się z dziewięciu rozdziałów, streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu treści, wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń, spisu literatury, załączników i zajmuje 123 strony. Wykaz literatury obejmuje 152 pozycje. Układ treści, podział na rozdziały, sformułowanie celu rozprawy oraz wniosków końcowych są czytelne i logiczne.

## **3.Ogólna ocena rozprawy**

Podstawowym zadaniem Doktoranta było znalezienie rozwiązania zadania mającego na celu wydłużenie czasu lotu Bezzałogowego Statku Powietrznego Pionowego Startu i Lądowania. Dodatkowo wspomniane postępowanie, ze względu na swoją uniwersalność ,miało również być stosowane w różnych typach BSP wliczając w to m.in.

VTOL, BSP klasy HALE (High Altitude Long-Endurance), LALE (Low-Altitude Long-Endurance) oraz w innych rodzajach BSP.

Stąd Doktorant w swojej pracy doktorskiej skupił się na opracowaniu ogólnego modelu układu solarnego zasilania BSP. W modelu uwzględniono efekt nasłonecznienia w zależności od daty, lokalizacji i warunków atmosferycznych, wpływ układu fotowoltaicznego, model opisujący sposób magazynowania energii oraz model zapotrzebowania energii.

W efekcie prac Autora powstał model symulacyjny, w którym wykorzystano dane uzyskane podczas badań laboratoryjnych. Badania obejmowały m.in.

ogniwa fotowoltaiczne, ogniwa bateryjne oraz inne układy znajdujące się pokładzie BSP. Zgodnie z przedstawionym zadaniem naukowym Doktorant proponuje odpowiednio opis matematycznych oddziaływań. Wspomniane problemy znajdują swoje odzwierciedlenie w recenzowanej rozprawie doktorskiej, a samo zagadnienia te zostały ujęte w aspekcie badań i analiz układów mechatronicznych, znajdujących zastosowanie w wielu dziedzinach.

Zagadnienia podjęte w pracy zostały przedstawione w dziewięciu rozdziałach, które w szczególności zawierają:

Rozdział pierwszy zawiera wprowadzenie do problemu naukowego przedstawionego w rozprawie doktorskiej, aktualny stan wiedzy oraz publikacje Autora na temat któremu poświęcona jest rozprawa doktorska. Analizując strukturę MBD należy zwrócić uwagę na znaczenie sformułowania problemu w szczególności planu projektu obejmującego wymagania projektowe, formalne procedury testowania i (co najważniejsze) proces wzajemnej oceny.

Rozdział drugi skupia się na przeglądzie literatury dotyczącej zagadnień ogólnych budowa bezzałogowego statku powietrznego zasilanego energią słoneczną, łącznie z systemami magazynowania energii, zewnętrznymi pozyskiwanie energii oraz metody łączenia paneli fotowoltaicznych z powierzchnią UAV.. Przyjęte modelowe procesy fizyczne mają za zadanie reprezentować rzeczywiste systemy, wykorzystując proste modele matematyczne do projektowania algorytmów sterowania, specyfikacji sprzętu i testowania podsystemów.

Innymi słowy modelowanie fizyczne to sposób na zdobycie podstawowych spostrzeżeń i obserwacji rzeczywistych systemów, ważnych dla zrozumienia interakcji procesu fizycznego z obliczeniami.

Stanowi to podstawę do określenia algorytmu sterowania — określenia warunków, sterowania procesami fizycznymi i opracowania procedur, które będą wykonywane przez wbudowany komputer, z uwzględnieniem, opóźnień, częstotliwości próbkowania, drgań i kwantyzacji. Pozwoli to na określenie wpływu wahań opóźnienia lub zmiennych

częstotliwości próbkowania wprowadzonych przez asynchroniczną formę obliczeń, nasycenia lub innych zniekształceń spowodowanych nieliniowościami wprowadzonymi przez sprzęt.

. Rozdział trzeci porusza problematykę modelowania środowiska symulacyjnego, biorąc pod uwagę modele napromieniowania, ograniczenie dopływu energii słonecznej Panele fotowoltaiczne, model ogniwa słonecznego, model magazynowania energii i model ogniwa fotowoltaicznego urządzenie sterujące pracą instalacji fotowoltaicznej. Taki opis systemu równocześnie pozwala ustalić przestrzenie konfiguracyjne, granice bezpieczeństwa, zbiory wejściowe i wyjściowe, punkty nasycenia i zachowanie modalne, charakteryzujące rozważane procesy fizyczne.

. W rozdziale czwartym przedstawiono wstępne wyniki sprawdzające poprawność działania modele. Wybrany model obliczeniowy ma ułatwić analizę systemu ze względu na czasu wykonania, osiągalność stanu, użycia pamięci i opóźnienia. Zaletą stosowania modelu obliczeniowego jest to, że określa on semantykę modelu, wykorzystanie konstrukcji czasowych i heurystykę.

W rozdziale piątym zaprezentowano studium przypadku, na którym zostaną przeprowadzone obliczenia. Pod uwagę wzięto trzy typy bezzałogowych statków powietrznych. Dwa stałopłaty UAV — LALE i Zajęcia HALE — a także opiekun ogona VTOL. Dane zawarte w tym rozdziale zostały opracowane częściowo przez inżynierów lotniczych. W rozdziale poruszono problematykę zapotrzebowania na energię UAV, szacunkową wartość energii wyprodukowanej przez UAV oraz bilans energetyczny w konkretnym okresie. Wybrany sprzęt powinien spełnić wymogi warunków środowiskowych, współdziałanie z modelowanymi systemami fizycznymi i realizować algorytm sterowania. Każdy komponent powinien być oceniany pod kątem szerokości pasma wejścia/wyjścia, opóźnienia wejścia-wyjścia itp.

Aby ułatwić tworzenie i interakcję wielu modeli, potrzebne są odpowiednie narzędzia umożliwiające symulację i syntezę z zachowaniem wymaganej o niezawodność środowiska programistycznego.

W rozdziale szóstym zaprezentowano dostrajanie modeli, które miało miejsce w teście. Ogniwa słoneczne, ogniwa akumulatorowe, folie stosowane do laminacji ogniw słonecznych i mikroskopowe przetestowano skalę ogniwa słonecznego. Dane uzyskane podczas testów zostały wdrożone w modelu symulacyjnym, dzięki czemu ostateczna konfiguracja systemu fotowoltaicznego został wybrany do każdego studium przypadku. W rozdziale przedstawiono także proponowane scenariusze lotu. Sam system musi zostać skonstruowany i zbudowany zgodnie ze specyfikacją, bowiem odchylenia od założonych parametrów mogą mieć wpływ

na efekty modelowania. Poszczególne komponenty i podsystemy powinny zostać poddane walidacji z wykorzystaniem modeli teoretycznych, co umożliwi porównanie wyników symulacji i testowania.

W rozdziale siódmym zaprezentowano wyniki pracy. Najważniejsze było uzyskanie informacji o wydłużeniu czasu lotu i możliwość uzyskania pełnej autonomii energetycznej. Algorytm musi być systematycznie sprawdzany, aby określić jego zachowanie we wszystkich lub określonych kombinacjach wejściowych z uwzględnieniem czasu na przeprowadzenie niezależnych testów każdego komponentu i podsystemu, konfigurując równocześnie regulowane parametry w celu stworzenia prostego środowiska testowego. Zakończeniem rozdziału jest opracowanie wniosków z przeprowadzonych analiz.

Rozdział ósmy dotyczy prac weryfikacyjnych. Jedno ze studiów przypadków — a UAV LALE — został wyprodukowany w trakcie pracy nad pracą dyplomową. Testy przeprowadzone w dniu docelowy UAV pozwolił sprawdzić poprawność działania modelu symulacyjnego na rzeczywistości obiekt.

Ostatni, dziewiąty rozdział podsumowuje wykonaną pracę, wyciąga wnioski, i rozważa dalsze etapy prac nad przyszłymi planami badawczymi.

Całość przeprowadzonych wywodów należy uznać za przekonujące. Przedstawiony materiał ma kompleksowy charakter i wskazuje na dobre przygotowanie warsztatowe Kandydata.

#### **4. Uwagi szczegółowe i zapytania**

Przedstawiona do recenzji rozprawa, jak już wspomniałem, jest obszernym przedstawieniem szeregu istotnych zagadnień ważnych dla dalszego rozwoju systemów mechatronicznych. Taki ujęcie pozwala Autorowi dodatkowo analizować przyjęte rozwiązania i formułować wnioski co do dalszych prac i kierunków badań. Równocześnie w trakcie czytania rozprawy pozwala sformułować również kilka uwag.

. Czy przyjęte rozwiązanie jest możliwe przy wykorzystaniu zaproponowanego w pracy układu sterowania bez określenia wpływu losowości w pominięcia modeli probabilistycznych. Przykładowo w piątym rozdziale poruszono problematykę zapotrzebowania na energię UAV, szacunkową wartość energii wyprodukowanej przez UAV oraz bilans energetyczny w konkretnym, zdefiniowanych warunkach; czy rozważano użycie i opis problemu z wykorzystaniem modeli probabilistycznych i na tej podstawie określanie dopuszczalnych wartości odchyłek?

Podobnie w rozdziale szóstym, dane uzyskane podczas testów zostały wdrożone do modelu symulacyjnego, dzięki czemu ostateczna konfiguracja systemu fotowoltaicznego została wybrana do każdego studium przypadku. W rozdziale przedstawiono także proponowane scenariusze lotu. Nasuwa się podobne pytanie, czy dobór parametrów nie powinien być poprzedzony badaniem wpływu zaburzeń losowych, nawet ograniczonych do wielowymiarowych modeli liniowych?

## **5. Końcowa ocena pracy**

Oceniając całość przedstawionej rozprawy należy podkreślić istotną wagę poznawczą i techniczną głównego problemu pracy. Autor w głównej mierze skupił się nad opracowaniem metody projektowania i kształtowania charakterystyk autonomicznych obiektów latających typu dron, co w pełni wyczerpuje zakres rozprawy doktorskiej. Takie ujęcie pozwala całkowicie ocenić poprawność przyjętej metodyki postępowania, przeprowadzić analizę i zweryfikować otrzymane wyniki.

Zagadnienie zostało rozwiązane samodzielnie, a uzyskane rezultaty mogą być w części wykorzystane bezpośrednio w postaci rozwiązań aplikacyjnych, w części stanowią przesłankę do dalszych badań metodycznych. Rozwiązując zadanie określone w pracy Autor wykazał się dobrą znajomością i wyczuciem problemów technicznych i rzetelną wiedzą. Połączenie tej wiedzy ze znajomością zasad symulacji i metod prowadzenia badań laboratoryjnych umożliwiło Doktorantowi rozwiązanie interesującego zadania naukowego.

W szczególności warto podkreślić merytoryczną stronę rozprawy, w tym kompleksowe opracowanie procedur komputerowego projektowania układów mechatronicznych. Szczególną wagę ma połączenie badań laboratoryjnych, z aplikacją, bowiem wskazuje na możliwość wdrożenia uzyskanych wyników rozprawy.

Na uwagę zasługuje zakres prac badawczych, które umożliwiły opracowanie recenzowanej rozprawy doktorskiej, oryginalność rozwiązania istotnego zagadnienia naukowego, a tym samym fakt potwierdzenia umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktoranta. Stąd, przedłożona rozprawa może służyć za podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. Wobec spełnienia wszystkich wymogów ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 2018 roku stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Krzysztofa Matei do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

