

dr hab. inż. Ireneusz Wróbel, prof. ATH

Bielsko-Biała, 28.07.2023

Katedra Podstaw Budowy Maszyn

Wydział Budowy Maszyn i Informatyki

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Kamila Zenowicza

pod tytułem

### **Optimisation of Unmanned Aerial Vehicle of Unlimited Flight Endurance**

**promotor pracy: dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. nzw. w Pol. Śl.**

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Mechanicznej Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Ewy Majchrzak z dnia 26.04.2023.

#### **1. Wprowadzenie, formalna prezentacja rozprawy**

Rozprawa doktorska zawiera 118 stron, napisana jest w języku angielskim i składa się z siedmiu rozdziałów, bibliografii oraz streszczenia w języku polskim. Dotyczy ona metodyki badań oraz optymalizacji konstrukcji bezzałogowego statku powietrznego Twin Stratos. Praca doktorska jest rozpatrywana jako osiągnięcie w dyscyplinie naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do zagadnienia. Doktorant opisał w nim klasyfikację bezzałogowych statków powietrznych mając na uwadze ich różne parametry techniczne (waga, zasięg, maksymalna wysokość lotu itp.). Na podstawie analizy literatury Doktorant przedstawił problematykę związaną z technicznymi aspektami lotu bezzałogowych statków powietrznych zasilanych energią słoneczną, operujących na wysokościach stratosferycznych.

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia .....16.08.2023.....  
RDSM z 1681/511 2023  
nr ..... zał. ....

W rozdziale drugim zaprezentowano przedmiot badań jakim był bezzałogowy statek powietrzny zasilany energią słoneczną operujący na dużych wysokościach (ponad 15 km). Doktorant przedstawił opis konstrukcji projektowanego statku powietrznego z dwoma symetrycznymi kadłubami a konstrukcja ta została nazwana Twin Stratos.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił przegląd aktualnego stanu techniki dotyczący metodyki projektowania statków powietrznych. Parametry techniczne, które należy wziąć pod uwagę podczas projektowania i optymalizacji konstrukcji podzielił na:

- parametry fizyczne powietrza na wysokości przelotowej,
- masa i położenie środka ciężkości,
- parametry geometryczne związane z kształtem analizowanej konstrukcji,
- siły aerodynamiczne działające na analizowaną konstrukcję,
- parametry związane z właściwościami materiału konstrukcyjnego,
- parametry związane z układem napędowym.

Doktorant podał metody identyfikacji wartości wszystkich wskazanych powyżej parametrów.

W rozdziale czwartym *Methodology of analysis and optimisation of the considered structure* Doktorant przedstawił metodologię projektowania konstrukcji statku powietrznego Twin Stratos. Zaproponował czteroetapowe podejście do wykonania projektu statku powietrznego. Pierwsze cztery etapy prowadziły do uzyskania pożądanej postaci konstrukcyjnej projektowanego obiektu. Ostatnim etapem zaproponowanej metodologii była optymalizacja położenia belki głównej dźwigara konstrukcji skrzydła oraz optymalny dobór liczby warstw kompozytów z którego zbudowany jest dźwigar.

W rozdziale piątym przedstawiono dokładne wyniki analiz prowadzonych zgodnie z wcześniej zaproponowaną metodologią projektowania. Zaprezentowano wyniki uzyskane w każdym z założonych etapów.

W rozdziale szóstym Doktorant przedstawił metodykę optymalizacji elementów konstrukcji skrzydła głównego, budowę modelu dyskretnego oraz definicję parametrów materiałowych poszczególnych warstw kompozytu. Zaprezentował także wyniki przeprowadzonej procedury optymalizacyjnej.

Praca została podsumowana odpowiednimi wnioskami i propozycją dalszych badań.

Bibliografia rozprawy doktorskiej to 119 pozycji z szerokiego zakresu dotyczącego budowy i konstrukcji statków powietrznych. Zestaw źródeł literaturowych uważam za poprawny.

## **2. Ocena merytoryczna pracy**

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Zenowicza porusza zagadnienia związane z projektowaniem optymalnych konstrukcji bezzałogowych statków powietrznych. Przedmiotem badań był bezzałogowy statek powietrzny, który może być obsługiwany zdalnie przez człowieka lub może latać i działać autonomicznie. Konstrukcja zakładała połączenie dwóch kadłubów jednym stałym skrzydłem oraz ogonem w układzie A. Założono, że może on latać na zwiększonych pułapach stratosferycznych, ma zwiększoną długość lotu i możliwość udźwigu dodatkowego oprzyrządowania badawczego.

Bezzałogowe statki powietrzne są wykorzystywane w wielu dziedzinach życia i techniki oraz jak pokazują ostatnie wydarzenia w Ukrainie są ważnym elementem uzbrojenia każdej armii. Można stanowczo stwierdzić, że ich konstrukcje są aktualnie bardzo mocno rozwijane na całym świecie. Rozwój bezzałogowych statków powietrznych jest tak szybki, że przepisy prawne nie nadążają za ich zmianami, możliwościami i nowymi zastosowaniami oraz często nie obejmują ich nowych możliwości lotniczych. W szczególności dotyczy to bezzałogowych statków operujących na bardzo dużych wysokościach. Z wyżej wymienionych względów podjęcie tematyki projektowania i rozwoju bezzałogowych statków powietrznych w ramach realizacji pracy doktorskiej jest bardzo ważne i cenne.

Celem recenzowanej pracy doktorskiej pod tytułem *Optimisation of Unmanned Aerial Vehicle of Unlimited Flight Endurance* jest opracowanie modelu numerycznego, metodologii analizy i metodologii optymalizacji bezzałogowego, napędzanego elektrycznie samolotu stratosferycznego o nieograniczonej długości lotu, a następnie przeprowadzenie analiz aerodynamicznych i wytrzymałościowych w celu optymalizacji struktury głównego skrzydła prezentowanego obiektu.

Wyżej wymienione zadania cechuje wysoki poziom użyteczności i obejmuje swoim zakresem opracowanie metodyki badań i optymalizacji konstrukcji bezzałogowych statków powietrznych. Ze względu na warunki lotu na dużych wysokościach i wymóg ograniczonego zapotrzebowania na energię, która napędza statek wymagane było znaczne zmniejszenie masy projektowanego obiektu. Wymusiło to zastosowanie bardzo elastycznej konstrukcji samolotu oraz odpowiednie zaprojektowanie jego skrzydła. Należy podkreślić, że bezzałogowe statki powietrzne operujące na dużych wysokościach są dość rzadkie. Brakuje przepisów dotyczących lotów tego typu konstrukcji. Przepisy europejskie nie obejmują swym zakresem samolotów stratosferycznych, co za tym idzie brakuje metodologii dotyczącej projektowania tych obiektów. Metodologia, która jest stosowana się dla standardowych bezzałogowych statków powietrznych nie sprawdza się w przypadku omawianych konstrukcji, ponieważ nie uwzględnia parametrów fizycznych związanych z powietrzem oraz temperaturą jaka panuje na wysokościach przelotowych statków stratosferycznych.

Aby zrealizować cel pracy Doktorant opracował odpowiednią metodykę analizy i optymalizacji struktury nośnej projektowanego statku powietrznego. Składała się ona z czterech etapów:

- Pierwszy etap to opracowanie wstępnych założeń dotyczących gabarytów obiektu, wielkości powierzchni sterowych oraz założenie parametrów masowych, określenie rodzaju napędu i początkowych parametrów lotu.
- Drugi etap projektowania dotyczył wyznaczenia parametrów aerodynamicznych i geometrycznych, rozkładu masy, wyznaczenie momentów i sił działających na konstrukcję.
- Trzeci etap to opracowanie rozwiązań konstrukcyjnych struktur wewnętrznych, analizy numeryczne oraz określenie parametrów zmiennych na potrzeby optymalizacji analizowanej konstrukcji.
- Czwarty etap związany był z optymalizacją konstrukcji obiektu. Przeprowadzono analizy statyczne konstrukcji dla wybranych parametrów krytycznych i wyznaczono optymalną lokalizację dźwigara głównego zoptymalizowanego skrzydła

Teza rozprawy została sformułowana na stronie 9 w następujący sposób: wykorzystując proces projektowania konstrukcji z wykorzystaniem modeli

generatywnych i symulacji podsystemów, struktur oraz opracowaną metodologię optymalizacji, możliwe jest przeprowadzenie częściowo zautomatyzowanej optymalizacji bezzałogowego statku powietrznego o wysoce elastycznej strukturze, która może osiągnąć nietypową wysokość i długość lotu.

Uważam, że przedstawiony w rozprawie doktorskiej cel został osiągnięty a postawioną tezę udowodniono.

Należy zauważyć, że Doktorant wykazał się dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy naukowej i technicznej w zakresie analizowanej tematyki. Szeroki zakres prowadzonych prac badawczych świadczy o dojrzałości naukowej Doktoranta.

Do głównych osiągnięć i zalet pracy doktorskiej zaliczyć można:

- trafny dobór tematyki badań, która jest bezpośrednią realizacją zapotrzebowania branży związanej z samolotami bezzałogowymi,
- zaproponowanie autorskiej metodyki analizy i optymalizacji struktury nośnej projektowanego statku powietrznego o dużej wysokości i długotrwałości latania i elastycznej konstrukcji,
- opracowanie założeń dotyczących zasad bezpieczeństwa dla których można prowadzić analizy podobnych konstrukcji statków powietrznych,
- w wyniku opracowanej metodologii i etapów analizy wskazano optymalną lokalizację dźwigara głównego zoptymalizowanego skrzydła,
- opracowana konstrukcja statku powietrznego spełniła zakładane wymogi, jeśli chodzi o masę i udźwig,
- opracowano autorską metodę postępowania podczas konstruowania bezzałogowych statków powietrznych osiągających duże wysokości i długości lotów,
- interdyscyplinarne podejście do rozpatrywanego problemu,
- zdefiniowano dalsze kierunki rozwoju konstrukcji bezzałogowego statku powietrznego i rozwoju opracowanej metodyki badań.

### 3. Uwagi redakcyjne

W treści rozdziałów można znaleźć drobne błędy redakcyjne nie mające istotnego wpływu na merytoryczną ocenę pracy doktorskiej. To są na przykład nieczytelny rysunek 68 na stronie 71 oraz rysunek 75 na stronie 81.

### 4. Uwagi krytyczne

W całej pracy doktorskiej słowo *optimisation* zostało użyte około 90 razy. Moim zdaniem w wielu przypadkach autor miał na myśli udoskonalenie lub ulepszenie konstrukcji pod względem zdefiniowanego kryterium a nie optymalizację rozumianą jako rozwiązanie zadania polegającego na znalezieniu takich wartości zmiennych decyzyjnych dla których funkcja celu osiąga minimum lub maksimum w zbiorze dopuszczalnym. Najbliżej podanej wyżej definicji zadania optymalizacyjnego była opracowana metodyka optymalizacji struktury skrzydła statku powietrznego, która została przedstawiona w rozdziale szóstym. Optymalizacja polegała na wyszukaniu najlepszego położenia głównej ściany dźwigara oraz najlepszej konfiguracji zastosowanych warstw wzmacniających dźwigara. Nie podano wprost jaki był cel optymalizacji. Zabrakło formalnego sformułowania zadania optymalizacyjnego, z podaniem jakie są zmienne decyzyjne, ograniczenia oraz jaką postać ma funkcja celu. Zadanie rozwiązano używając komercyjnego oprogramowania Ansys. Oprogramowanie to posiada wiele narzędzi i procedur do rozwiązywania zadań optymalizacji parametrycznej, topologicznej, analizy wrażliwości, które należy odpowiednio dobrać do typu rozwiązywanego zadania. Nie podano jednak jakiego typu procedury zostały użyte podczas analizy zadania optymalizacyjnego prowadzonego w ramach realizacji pracy doktorskiej.

Dlaczego w analizie optymalizacyjnej wykorzystano kryterium zniszczenia Tsai-Wu. Wybrane kryterium nie pozwala na przewidzenie różnych trybów zniszczenia kompozytu w tym bardzo ważnego zjawiska jakim jest delaminacja. Nie oceniono przydatności zastosowanego kryterium do wyznaczenia współczynnika bezpieczeństwa w analizowanym skrzydle.

Wątpliwości moje budzi też sposób określenia parametrów mechanicznych elementów kompozytowych. Dane te zostały zaczerpnięte z biblioteki oprogramowania Ansys.

Doświadczenie inżynierów konstruktorów i technologów zajmujących się konstrukcjami kompozytowymi wskazuje, że parametry mechaniczne produkowanych elementów kompozytowych bardzo mocno zależą od konkretnej technologii ich wykonania. Ten sam kompozyt wykonany przez różnych producentów (w szczególności podczas jednostkowej produkcji) może mieć różne parametry mechaniczne. Należałoby wykonać w tym zakresie badania doświadczalne, aby wykorzystując próbki wykonane w określonej technologii, móc wyznaczyć niezbędne do analiz MES parametry mechaniczne elementów kompozytowych.

## **5. Wnioski końcowe**

Rozprawa doktorska mgra inż. Kamila Zenowicza dotyczy opracowania autorskiej metodyki badań i optymalizacji konstrukcji bezzałogowego statku powietrznego Twin Stratos przeznaczonego do operacjach na dużych wysokościach ze zwiększoną długością lotu. Doktorant trafnie sformułował problem naukowy i przedstawił jego autorskie rozwiązanie.

Rozprawa zawiera wiele ciekawych oryginalnych i autorskich rozwiązań technicznych, które są związane z konstrukcją statku powietrznego oraz sposobem ich analizy. Można je zaliczyć do cennych osiągnięć Doktoranta o charakterze konstrukcyjnym. W zakresie prowadzonych symulacji komputerowych Doktorant wykazał się doświadczeniem i dużą wiedzą.

Recenzowana dysertacja spełnia na dobrym poziomie ustawowe wymagania stawiane pracy doktorskiej w zakresie nauk technicznych. Biorąc pod uwagę wskazane powyżej konkluzje, wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Kamila Zenowicza do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Bielsko-Biała, 28.07.2023

*Jacek Wróbel*