

Dr hab. inż. Piotr Lampart, prof. IMP PAN
Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN

Gdańsk 20.02.2025

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pauliny Zenowicz wykonana na zlecenie
Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej
(pismo RDIME.512.22.2024)**

1. Wstęp.

Przedstawiona do opinii praca doktorska mgr inż. Pauliny Zenowicz pt. „Comparative analysis of the drone configuration in terms of stability criteria” została wykonana w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn przy Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Wojciecha Moczulskiego. Rozprawa doktorska napisana jest w języku angielskim i liczy 119 stron. Zawiera spis treści, 7 rozdziałów, bibliografię oraz streszczenie w języku angielskim i polskim.

Praca doktorska poświęcona jest obecnie dynamicznie rozwijającej się technologii dronów – bezzałogowych statków powietrznych stosowanych zarówno przez siły zbrojne, jak i powszechnie stosowanych w różnych sektorach gospodarki cywilnej, dla celów obserwacji i rozpoznania terenu oraz zbierania określonych danych, a także dla transportu ładunków.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Zenowicz rozpoczyna się od przedstawienia klasyfikacji strukturalnej dronów oraz rozwiązań w zakresie aerodynamiki części ogonowej tych maszyn decydującej dla zachowania stabilności lotu drona w czasie wykonywania zadań. W kolejnej części Wstępu (rozdz. 1) autorka dokonuje przeglądu konkretnych modeli dronów charakteryzujących się dalekim zasięgiem, dużą wysokością przelotową, zasilaniem w postaci paneli słonecznych i baterii elektrycznych. Następnie przytacza regulacje prawne dla poszczególnych kategorii dronów, a w końcowej części przedstawia cel, zakres i tezę pracy.

Cel rozprawy doktorskiej określony jest jako opracowanie innowacyjnych metod projektowania i symulacji różnych konfiguracji dronów w celu zwiększenia ich uniwersalności i adaptacyjności do różnorodnych zastosowań. W szczególności zakłada się wykorzystanie zaawansowanych metod obliczeniowych do przeprowadzania symulacji różnych konfiguracji usterzenia drona i zrozumienie, w jaki sposób wpływają one na stabilność drona. Badania mają umożliwić identyfikację różnych rozwiązań konfiguracyjnych dla poprawy efektywności operacyjnej konkretnych misji, takich jak monitorowanie środowiska.

Rozprawa doktorska posiada także tezę, która mówi, że możliwe jest wybranie konfiguracji sekcji ogonowej danego bezzałogowego statku powietrznego (UAV), która jest optymalna pod względem spełnienia kryteriów stabilności, przy czym proces optymalizacji może wykorzystywać wyniki pochodzące zarówno z symulacji numerycznych jak i obliczeń analitycznych. Wybór konfiguracji uwzględnia typowe profile lotu i warunki operacyjne określone przez zamierzone zastosowanie UAV.

W rozdziale drugim przedstawiono obiekt badań, którym jest rodzina bezzałogowych statków powietrznych Twin Stratos. W pracy doktorskiej zajęto się modelem 1:7 (TS17), który scharakteryzowano poprzez podanie parametrów geometrycznych i parametrów pracy. W końcowej części rozdziału przedstawiono zastosowania rozważanej rodziny dronów, które obejmują: wojskowość, telekomunikację, meteorologię, obserwację i rozpoznanie terenu, kontrolę przeciwpożarową, badanie natężenia ruchu, inspekcję upraw.

Rozdział 3 stanowi przegląd metod oceny i kontroli stateczności ruchu statku powietrznego. Opisano zagadnienie stabilności w ruchu stacjonarnym i niestacjonarnym. Przedstawiono wyrażenia na momenty sił działających na statek będące podstawą do dalszych rozważań w zakresie stabilności ruchu. Przedstawiono metodę analitycznego badania podłużnej stabilności statycznej i dynamicznej. Opisano metody numerycznego wyznaczania przepływu wokół statku, w tym w oparciu o metody RANS, LLT (lifting line theory), VLM (vortex lattice method) oraz metody panelowe. Przywołano także metody eksperymentalne badań stateczności statków powietrznych z wykorzystaniem tuneli aerodynamicznych, testów ruchowych, testu Coopera-Harpera i in. Przedstawiono także klasyfikację konfiguracji ogonowych statków powietrznych rozważanych w pracy.

Rozdział 4 poświęcony jest metodologii prowadzonych badań, w szczególności selekcji parametrów lotu, parametrów geometrycznych i możliwych zmian strukturalnych w obrębie części ogonowej, oraz parametrów kontrolnych decydujących o stabilności ruchu. Jako parametry kontrolne – kryteria ewaluacji przyjęto margines stabilności, położenie punktu centrum aerodynamicznego, współczynnik momentu przechylającego, współczynnik siły nośnej i współczynnik oporu (w skali 1 do 10, z odpowiednimi współczynnikami wagowymi). Optymalna wartość marginesu stabilności stanowi balans pomiędzy stabilnością i manewrowością. Właściwe położenie punktu centrum aerodynamicznego oraz wartości współczynnika momentu przechylającego są istotne dla zachowania stateczności podłużnej. Z kolei współczynnik siły nośnej ważny jest z punktu widzenia realizacji lotów, także stabilności, a współczynnik oporu determinuje zużycie paliwa i także jest istotny z punktu widzenia stabilności lotu.

W rozdziale 5 opisano proces przygotowania geometrii i procesu obliczeniowego w środowiskach Ansys CFX oraz XFLR5. W środowisku Ansys opisano tworzenie geometrii, budowę siatek obliczeniowych, wybór warunków brzegowych i modelu obliczeniowego (RANS $k-\epsilon$). W środowisku XFLR5 przygotowano geometrię profilu drona (2D) oraz geometrię części ogonowej 3D. Przygotowano dyskretyzację metodą 3D panel method. W końcowej części rozdziału przedstawiono także parametry lotu podczas pięciu lotów testowych, które posłużą analizie teoretycznej i do walidacji rezultatów obliczeniowych.

W rozdziale 6 zebrano uzyskane wyniki obliczeniowe otrzymane z pomocą programów Ansys i XFLR5 dla pięciu konfiguracji części ogonowej, oraz czterech warunków lotu – lot nominalny oraz trzy loty w warunkach krytycznych. Otrzymano dość istotne rozbieżności pomiędzy wynikami otrzymanymi z dwóch programów. W związku z tym w następnym rozdziale przedstawiono porównanie danych eksperymentalnych i obliczeniowych siły ciągu i siły oporu dla trzech przypadków testowych. Zdecydowanie korzystniej wypadają tu obliczenia otrzymane z pomocą programu Ansys.

Konsekwentnie, ten właśnie program wykorzystano do dalszych badań numerycznych stateczności obiektu latającego. Przedstawiono wyniki obliczeń dla siły ciągu, siły oporu, momentów przechylających względem trzech osi w zależności od kąta odchylenia lotu od toru nominalnego w trzech kierunkach. Na podstawie tych obliczeń przeprowadzono ocenę punktową z zastosowaniem funkcji wagowych poszczególnych konfiguracji ogonowych drona. Najlepszy wynik uzyskały konfiguracje 1 i 2 (V-shaped, inversed V-shaped tail).

Najlepsza punktowo konfiguracja 2 charakteryzuje się wysokim wynikiem w zakresie marginesu stabilności, położenia punktu centrum aerodynamicznego, współczynnika momentu C_m , siły nośnej C_l i siły oporu C_d , co daje optymalną równowagę między stabilnością statyczną a wydajnością aerodynamiczną. Konfiguracja daje odpowiedni zapas stabilności niezbędny do bezpiecznej eksploatacji samolotu. Konfiguracja 1 zajmuje drugie miejsce również z wysokim wynikiem dla współczynnika siły nośnej i marginesu stabilności. Jednak posiada gorszy współczynnik oporu. Konfiguracja 5 wyróżnia się najwyższą oceną pod względem współczynnika oporu, jednak ma niższe oceny w innych kryteriach, takich jak margines stabilności i współczynnik C_m , co sugeruje gorszą stabilność statyczną. Konfiguracje 4 i 3 uzyskały najniższe wyniki. Ostatecznie w rozdz. 6.5 jako najlepszą wybrano konfigurację 1, która umożliwia lądowanie na kadłubie.

Ważną częścią pracy jest rozdz. 7, który zawiera podsumowanie otrzymanych wyników pracy i oryginalnych elementów badań. Autorka skupia się na wypełnieniu celów pracy oraz prezentacji najważniejszych wyników użytkarnych, czyli wyborze najlepszej konfiguracji ogonowej drona. Rozdział 7 zawiera też rekomendację do dalszych badań.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Wydaje się, że Doktorantka zrealizowała z powodzeniem postawiony cel pracy, czyli opracowanie innowacyjnych metod projektowania i symulacji różnych konfiguracji dronów oraz wykorzystanie zaawansowanych metod obliczeniowych do przeprowadzania symulacji różnych konfiguracji usterzenia drona i zrozumienie, w jaki sposób wpływają one na stabilność drona. Oryginalnym osiągnięciem Autorki jest wyznaczenie optymalnej pod względem stateczności statycznej lotu konfiguracji ogonowej bezzałogowego statku powietrznego. Potwierdziła tym samym postawioną w pracy tezę. Autorka rozwiązała samodzielnie oryginalny problem naukowy, otrzymała przy tym wartościowe rezultaty, które wnoszą wkład do inżynierii mechanicznej. Przy tym wykazała się dużą wiedzą z zakresu aerodynamiki lotniczej, zagadnień stabilności ruchu statku powietrznego i numerycznej mechaniki płynów.

Sposób przygotowania do badań, dobór metod badawczych, programów obliczeniowych jest prawidłowy i logiczny. Zwraca uwagę szeroki zakres przedstawionych badań aerodynamicznych, które wykonano z dużą starannością. Wyniki obliczeń są także starannie opisane i należyście ilustrowane. Opracowanie graficzne rysunków i tabel w zdecydowanej większości nie budzi zastrzeżeń. Sformułowane wnioski z badań również nie budzą zastrzeżeń. Praca napisana jest poprawnym językiem angielskim, przy użyciu poprawnej i zaawansowanej terminologii. Odwołania do literatury przedmiotu są także właściwe.

Mankamentem pracy jest brak sekcji nomenklaturowej, w tym spisu oznaczeń, łącznie z jednostkami miar rozważanych wielkości fizycznych. Co prawda wielkości występujące we wzorach są objaśniane w tekście po każdym wzorze, jednakże nie wszystkie. Często także indeksy nie są objaśniane, co utrudnia interpretację i ocenę wzorów (np. wzory 14-30). Brak jest definicji wielkości bezwymiarowych (jak ubezwymiarowano?) – współczynników sił i

momentów. Sama edycja wzorów jest przeważnie dość staranna. Wzory powinny być jednak czytane razem z tekstem; wymagane jest zatem stosowanie ogólnych zasad interpunkcji. Niestety, wzory 5-9 zawierają całe mnóstwo błędów – gęstość z indeksami?, E z indeksem r?, itp. Prawdopodobnie wzory te kopiowano z literatury, na co wskazują odniesienia do literatury, z pomocą edytora typu „recognita”, który zakwalifikował niektóre wielkości jako indeksy, a z kolei niektórych indeksów nie rozpoznał.

Podział pracy na rozdziały jest logiczny. W dużej części rozdziały te są zredagowane zwięźle i starannie, choć z wyjątkami. W mojej opinii w tytule rozdz. 2 zamiast słowa „subject” bardziej pasowałoby słowo „object”. Rozdz. 5 wydaje się raczej rozwlekły, choć brakuje w nim ważnej rzeczy jaką jest badanie niezależności rozwiązań od wielkości / rozdzielczości przyjętej siatki obliczeniowej (obliczenia CFD). Z kolei wyniki w rozdz. 6 przedstawione są w sposób bardzo czytelny, dobrze stabelaryzowane i zilustrowane. Praca w całości jest zredagowana starannie. Literówki i błędy gramatyczne są nieliczne.

Streszczenie jest sformułowane dość niefortunnie. Brakuje w nim oczekiwanej chronologii, takiej jak tło pracy, przedstawienie celu i tezy, metody badań, wyeksponowanie najważniejszych wyników badań i przedstawienie wniosków z badań. Sugeruję, aby streszczenia w obu językach poprawić przed wysłaniem do systemu zbierania danych nt. prac doktorskich.

4. Wniosek końcowy.

Przedstawiona rozprawa doktorska posiada wysoką wartość naukową i użyteczną. Autorka rozwiązała samodzielnie oryginalny problem badawczy z zakresu aerodynamiki lotniczej. Wyznaczyła optymalną pod względem stateczności statycznej lotu konfigurację ogonową bezzałogowego statku powietrznego. Wykazała się przy tym dużą wiedzą z zakresu aerodynamiki lotniczej, zagadnień stabilności ruchu statku powietrznego i numerycznej mechaniki płynów. Wysokiej oceny rozprawy nie podważają sformułowane w recenzji uwagi krytyczne i dyskusyjne. W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Zenowicz spełnia wymagania dla prac doktorskich zapisane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, oraz wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Prof. P. Lampart

/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)**