

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Zuzanny Kunickiej Kowalskiej
p.t. " „Modelowanie opływu skrzydła trzepoczącego owada na przykładzie
motyla *Attacus atlas*” wykonanej
w Politechnice Warszawskiej
pod kierownictwem
Promotora prof. dr. hab. inż. Krzysztofa SIBILSKIEGO
Promotora pomocniczego dr. inż. Michała LANDOWSKIEGO

1. Wprowadzenie

Recenzowana rozprawa dotyczy poszukiwania nowych rozwiązań technicznych w obszarze projektowania bezzałogowych statków powietrznych (BSP). W ostatnich dekadach XX w. bezzałogowe statki powietrzne przeżywają szczególnie burzliwy rozwój objawiający się w mnogości konstrukcji i rodzajów zastosowań cywilnych i wojskowych. Ostatnie konflikty zbrojne i operacje militarne dostarczają argumentów przemawiających za rosnącym znaczeniem bezzałogowych statków powietrznych. Obecnie niemal wszystkie kraje dysponujące mniej lub bardziej zaawansowaną taką technologią lotniczą i prowadzą prace nad tego typu konstrukcjami. Niewysokie koszty projektowania, produkcji, oraz eksploatacji BSP czynią je bardzo atrakcyjnymi również dla krajów niezamożnych, o stosunkowo niskich nakładach na obronę. Szczególnie istotną wydaje się być idea podwójnego zastosowania systemów bezzałogowych statków powietrznych (SBSP), co pozwala na rozłożenie kosztów ich eksploatacji a także społeczną akceptację ogólnych kierunków rozwoju lotnictwa bezzałogowego ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań komercyjno-militarnych. Jak wskazują badania i obserwacja rynków, jest to pozytywny impuls dla biznesu i gospodarki aby inwestować w przyszłość tego przedsięwzięcia. O znaczeniu BSP świadczy również wzrost nakładów ponoszonych przez największe potęgi gospodarcze i zbrojeniowe. BSP są kategorią samolotów, które w ocenie wielu ekspertów w bieżącym stuleciu całkowicie zdominują nie tylko sferę militarną ale całą branżę lotniczą. Praca dotyczy zaimplementowania pozyskanej wiedzy w przyszłe rozwiązania projektowe bezzałogowych małych obiektów latających klasy mikro (Micro AIR Vehicle - MAV), których to wyzwania techniczne dotyczą: aerodynamiki i sterowanie przy małych liczbach Re , ultralekkich źródeł energii i napędu, autonomicznej nawigacji sterowania i pilotowania oraz ultralekkich czujników i systemów przekazywania informacji (w tym obrazu).

2. Omówienie treści rozprawy

Praca zawiera 164 strony i składa się z trzynastu rozdziałów oraz trzech załączników. Zawarto w niej 53 rysunki przedstawiające schematy oraz wyniki badań w postaci wykresów, 19 tabel oraz 32 wzory. W treści pracy Autorka odwołała się do 87 pozycji literaturowych.

We wstępie Doktorantka opisała problematykę jaką się zajmowała oraz charakterystykę analizowanych problemów. W rozdziale drugim Autorka przeprowadziła szczegółowy przegląd literatury dotyczącej jej obszaru badań wraz z identyfikacją niedostatku literaturowego i badawczego dotyczącego analiz z zakresy aeroelastyczności skrzydeł trzepoczących.

Następnie w rozdziale trzecim dokonała analizy budowy skrzydeł owadzych, opisała porównanie zjawisk mechaniki płynów dla istot żywych i obiektów mechanicznych w zastosowaniu liczb podobieństwa tj.: liczby Reynoldsa (Re), liczby Strouhala (St), zredukowanej częstotliwości (k) oraz przedstawiła istotne zjawiska aerodynamiczne trzepoczących skrzydeł. W rozdziale czwartym Autorka przedstawiła model matematyczny ruchu skrzydła, natomiast w rozdział piąty zaprezentowała hipotezy badawcze wraz z ich metodologią badań, sformułowanymi celami badawczymi oraz schematami obliczeniowymi dotyczącymi skrzydła sztywnego i elastycznego.

Rozdział szósty opisuje sześć modeli do obliczeń numerycznych o różnym stopniu uproszczenia. Aspekty eksperymentalno-analityczne zawarto w rozdziale siódmym gdzie zdefiniowano obiekt badań czyli owad *Attacus atlas* oraz w badaniach tunelowych i przy pomocy skanowania 3D uzyskano przemieszczenia wybranych punktów na skrzydle owada dla całego cyklu ruchu trzepoczącego.

Do badań wytrzymałościowych w celu określenia wartości modułu Younga dla różnych materiałów, zaprojektowano i zbudowano stanowisko dostosowane do badań materiałów biologicznych. Działania te opisano w rozdziale ósmym, natomiast przy wykorzystaniu oprogramowania Ansys Fluent w rozdziale dziewiątym Doktorantka przeprowadziła analizę ruchu skrzydła sztywnego.

W rozdziale dziesiątym i jedenastym przeprowadzono badania modelu 5 (zmienna grubość skrzydła) i 6 (z uwzględnieniem użyłkowania) z różnymi uproszczeniami w oparciu o środowisko Ansys do obliczeń FSI. W wyniku tych badań uzyskano właściwe parametry sił działających na skrzydło owada i symulowany ruch skrzydła był bardzo zbliżony do zaobserwowanego u owada.

Celem weryfikacji badań symulacyjnych przeprowadzono badania eksperymentalne, które zostały opisane w rozdziale dwunastym. Doktorantka wykonała model rzeczywistego skrzydła na podstawie najbardziej wiarygodnego wirtualnego modelu 6 oraz przeprowadziła eksperyment w wyniku czego można stwierdzić, że w ocenie wizualnej odkształcenia skrzydła pokrywają się z zaobserwowanymi w naturze i analizie FSI. Następnie Autorka dokonała podsumowania badań i wskazała propozycje kierunków dalszych prac w rozdziale trzynasty.

Pracę kończy spis rysunków, tabel, literatura i załączniki:

- załącznik 1 – położenie punktów na skrzydle w czasie z badań tunelowych;

- załącznik 2 - stopnie obrotu skrzydła w punkcie wokół poszczególnych osi;
- załącznik 3 - zawiera kod programu sterującego skrzydłem w trakcie badań eksperymentalnych.

Pod względem edycji tekstu i szaty graficznej recenzowana rozprawa jest zredagowana starannie. Odwołania do literatury są adekwatne. Oczywiście, nawet przy najbardziej starannej redakcji trudno spodziewać się tekstu w pełni bezbłędnego. Wszystkie zauważone błędy redakcyjne zaznaczyłem w posiadanym egzemplarzu pracy, a stosowną informację przekazałem jej Autorowi.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Problematyka rozprawy jest bardzo złożona i wielowątkowa, należy uwzględnić różnorodność owadów (ponad 30 milionów gatunków), są też doskonałą podstawą do naśladowania. Ruch skrzydeł nie jest to prosty ruch typu „do góry i w dół” gdyż końcówka skrzydła owada wykonuje bardzo złożone ruchy. Ruch ten może być traktowany jako superpozycja trzech obrotów: wahań, odchyień i przekręceń. Można zatem zastosować opis podobny do stosowanego w mechanice lotu śmigłowców.

Analizując anatomię skrzydła owada można znaleźć trzy przeguby: poziomy (wahań), pionowy (odchyień) i skrętny (przekręceń). Przegub poziomy znajduje się u nasady skrzydła, jego osią jest twarda żyłka znajdująca się w miejscu wejścia skrzydła do wnętrza odwłoka - przegub ten umożliwi owadowi wykonywanie wahań skrzydłami do góry i w dół. Przegub pionowy stworzony jest poprzez promieniście rozchodzące się żyłki i znajduje się obok drugiego stwardnienia pachwinowego - przegub ten umożliwi odchylenie się skrzydeł. Przegub przekręceń - jego budowa jest bardziej złożona, ruch przekręceń umożliwi złożone współdziałanie stwardnień i odkształcalnych fałd.

W mojej ocenie podjęcie badań wykonanych w ramach realizacji ocenianej pracy doktorskiej jest zasadne. Jak to wynika już z przedstawionej powyżej charakterystyki ogólnej, rozprawa cechuje się niezbędnymi elementami oryginalności. Doktorantka swoją pracę oparła o motyle, które latają inaczej niż pozostałe owady, mają delikatne skrzydła o dużej powierzchni. Częstotliwość trzepotania skrzydeł motyla, jest niewielka i wynosi od 5 do 20 Hz. a jednostkowe obciążenie powierzchni nośnej ich skrzydeł jest małe (rzędu kilku kg/m²). Jako przedmiot badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych Doktorantka wybrała wielką ćmę gatunku *Attacus atlas*. Doktorantka przeprowadziła szereg obliczeń numerycznych, symulacyjnych i eksperymentalnych. Interesującym badaniem było między innymi, w celu identyfikacji kinematyki ruchu skrzydeł motyla, obserwacja żywego owada umieszczonego w przestrzeni pomiarowej tunelu aerodynamicznego gdzie ruch skrzydeł był filmowany jednocześnie z trzech stron, (z tyłu, z boku i z dołu), przy pomocy trzech zsynchronizowanych kamer. Po przeprowadzeniu analizy filmów Doktorantka uzyskała przemieszczenia charakterystycznych punktów na skrzydle owada, uzyskując serie danych do programów obliczeń przepływowych (metodą

analiz FSI (Fluid Structure Interaction). Zaprojektowała i zbudowała maszynę wytrzymałościową dostosowaną do badań materiałów biologicznych celem uzyskania średnich wartości modułu Younga dla analiz FSI. Symulacje FSI wykazały znaczący wpływ uproszczeń strukturalnych skrzydeł na ich efektywność aerodynamiczną. Najlepsze wyniki osiągnęła dla najbardziej złożonego modelu skrzydła, uwzględniającego strukturę użytkownika. Model ten najlepiej odwzorował rzeczywistą morfologię skrzydła motyla. Ze względu na ograniczenia oprogramowania (ANSYS Fluent) Doktorantka nie uzyskała pełnych wyników w pełnym cyklu trzepotania.

Dlatego też zdecydowała się na przeprowadzenie badań eksperymentalnych, gdzie silikonowy model skrzydła poruszał się w glicerynie. Ruch ten był filmowany. Analiza otrzymanych w ten sposób zdjęć pozwoliła na porównanie odkształceń z wynikami symulacji metodami FSI.

Po przeprowadzeniu pełnego cyklu badawczego Doktorantka potwierdziła hipotezę pierwszą, według której elastyczność skrzydeł motyla ma kluczowe znaczenie dla efektywności aerodynamicznej trzepoczących skrzydeł. Natomiast hipoteza druga, mówiąca o tym, że możliwe jest zamodelowanie ruchu trzepoczącego przy użyciu algorytmów oprogramowania komercyjnego, została potwierdzona jedynie częściowo.

Niewątpliwie rzetelna jest przeprowadzona na wstępie analiza stanu zagadnienia, za poprawne uważam również przyjęte metody badań i obliczeń. Uważam, że przedstawione dane oraz uzyskane wyniki są wartościowe i mogą stanowić źródło inspiracji do dalszych badań.

Uwagi szczegółowe, kilka z nich dla przykładu:

1. Brak wykazu oznaczeń;
2. W tekście występują drobne błędy redakcyjne, przekazane Doktorantce;
3. Nie wszystkie podane źródła literaturowe zostały przywołane w tekście pracy;
4. Brak źródeł dotyczących rysunków i tabel.

Pomimo uwag, treści merytoryczne rozprawy oceniam bardzo dobrze. Na ocenie ważą przede wszystkim zalety aktualności podjętej tematyki, jej interdyscyplinarność, skuteczność metod projektowo-obliczeniowych zastosowanych do określenia właściwości mechaniki lotu owadów oraz potencjalny aspekt praktyczny uzyskanych wyników.

Podsumowując ogólną ocenę zawartości merytorycznych rozprawy stwierdzam, że układ treści jest logiczny a proporcje prezentacji poszczególnych zagadnień nie budzą większych zastrzeżeń.

Proponuję pracę mgr. inż. Zuzanny Kunickiej Kowalskiej wyróżnić za:

- Identyfikację kinematyki skrzydła motyla oraz ich odkształceń na podstawie badań w tunelu aerodynamicznym żywego owada;
- Podejmowane w pracy ważne tematy w aspekcie teoretycznym i praktycznym,
- Jej interdyscyplinarność - badania symulacyjne, tunelowe i w locie, konstrukcje kompozytowe, metody numeryczne,
- Dojrzałość doktorantki jako badacza, konstruktora i technologa.

4. Wniosek końcowy

Na podstawie oceny przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej można stwierdzić, że podjęte w niej zadanie naukowo-badawcze zostało przez Autorkę zrealizowane. Rozprawa zawiera oryginalne osiągnięcia poznawcze i praktyczne, a sama Autorka wykazała się wysokimi kompetencjami w zakresie prowadzonych analiz teoretycznych i doświadczalnych.

Przedstawiam Szanownej Radzie Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej wniosek o dopuszczenie Pani mgr inż. Zuzanny Kunickiej Kowalskiej do publicznej obrony i przyjęcia ww. pracy, jako podstawy do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych.

Reasumując uważam, że praca doktorska mgr inż. Zuzanny Kunickiej Kowalskiej pt. „Modelowanie opływu skrzydła trzepoczącego owada na przykładzie motyla *Attacus atlas*” spełnia warunki określone w art. 13 ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z dnia 14.03.2003R).

