

Dr hab. inż. Andrzej Majka, prof. PRz
Katedra Samolotów i Silników Lotniczych
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
Tel.: +48 17 865 16 04
Andrzej.majka@prz.edu.pl
<http://www.prz.edu.pl/ksisl>

Rzeszów, 2020-08-20

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej

mgr inż. Zuzanny KUNICKIEJ - KOWALSKIEJ

**nt. „Modelowanie opływu skrzydła trzepoczącego owada
na przykładzie motyla *Attacus atlas*”**

promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Sławomir Sibilski

promotor pomocniczy: dr inż. Michał Karol Landowski

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję opracowano na prośbę Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, będącą konsekwencją Uchwały Rady Naukowej Dyscyplin z dnia 3.06.2020 r. (pismo o sygnaturze RNDIM/22/2020 z dnia 17.06.2020).

Ocena wyboru tematu

Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej mgr inż. Zuzanny Kunickiej - Kowalskiej odnosi się do bardzo interesującej i aktualnej tematyki związanej z badaniami nad fizyką lotu obiektów posiadających ruchome (trzepoczące) skrzydła.

W dobie intensywnego rozwoju rozmaitych aparatów bezzałogowych, bardzo duże znaczenie zyskują małe obiekty latające należące do klasy MAV (Micro Air Vehicle). Mogą one być wykorzystywane do wykonywania różnorodnych zadań, zarówno cywilnych jak i wojskowych. Loty zwiadowcze lub ratownicze, przeszukiwanie rumowisk po różnego rodzaju katastrofach, poszukiwanie ludzi w trudnodostępnych miejscach, w szczególności w pomieszczeniach zamkniętych mogą być realizowane w sposób bezpieczny i efektywny przez obiekty tego typu. Obecnie aparaty klasy MAV budowane są głównie w układzie wiroptatowym. Jednak duże zainteresowanie aparatami MAV wywołało ponownie duże zainteresowanie fizyką i mechaniką

lotu aparatów zaopatrzonych w trzepoczące skrzydła. Wynika to z poglądu, że trzepoczące skrzydła w małej skali oferują wyjątkowe zalety aerodynamiczne w porównaniu z wiroplątami oraz układami stało płatowymi. W wielu ośrodkach na świecie prowadzone są więc prace nad aparatami zaopatrzonymi w trzepoczące skrzydła. Oba układy, wiropląt i trzepoczące skrzydła, dają możliwość zarówno zawisu jak i lotu z małymi prędkościami. Również miniaturyzacja w zakresie urządzeń sterujących jak i komunikacyjnych umożliwia budowę aparatów klasy MAV w obu układach. Jednak niektóre cechy, takie jak mniejsza interferencja aerodynamiczna ze ścianami (przeszkodami), cichszy lot i większa odporność na zderzenia z przeszkodami sprawiają, że układ zaopatrzony w trzepoczące skrzydła jest bardziej atrakcyjny, szczególnie do prowadzenia obserwacji z małej odległości.

Aby jednak obiekty MAV z trzepoczącymi skrzydłami mogły być wykorzystywane w praktyce, muszą się charakteryzować wysoką efektywnością, która wynika z wysokiej sprawności napędowej i dobrej manewrowości. Poziomemu rozwojowi dronów wykorzystujących śmigła osiągnął granice miniaturyzacji, wynikające z wykonalności i możliwej efektywności napędu śmigłowego w mikro skali. Napęd z wykorzystaniem trzepoczących skrzydeł, na wzór rozwiązań obserwowanych w naturze stanowi alternatywę dla kolejnego kroku w technologicznym nurcie miniaturyzacji latających aparatów bezzałogowych. Inspirowane naturą, trzepoczące skrzydła stanowią lepsze rozwiązanie dla dronów klasy mikro niż miniaturowe śmigła pracujące przy niskich liczbach Reynoldsa, ponieważ generują szczególne zjawiska aerodynamiczne, które znacznie zwiększają wytwarzaną siłę nośną i ciąg.

Trzepoczący ruch skrzydeł na wzór skrzydeł owadzi generuje cztery specyficzne zjawiska aerodynamiczne, które w znacznym stopniu poprawiają wytwarzany ciąg: ustabilizowany wir krawędzi natarcia, efekt Kramera, przechwytywanie śladu wirowego (wake capture effect) oraz efekt masy związanej. Mechanizm "clap'n'fling" daje jeszcze dodatkowe efekty korzystnie wpływające na wartości sił aerodynamicznych wytwarzanych przez trzepoczące skrzydła. Dzięki tym zjawiskom aerodynamicznym małe trzepoczące skrzydła generują większy ciąg niż miniaturowe śmigła o porównywalnej wielkości. Co więcej, przy odpowiednim dopasowaniu częstotliwości i elastyczności skrzydeł do ich wielkości, osiągi (definiowane jako stosunek ciągu do mocy) trzepoczącego skrzydła owadopodobnego są lepsze niż osiągi śmigła wytwarzającego porównywalny ciąg.

Ze względu na małe znaczenie układów z ruchomymi skrzydłami w lotnictwie załogowym, badania nad aerodynamiką trzepoczących skrzydeł w XX wieku były prowadzone głównie przez biologów i zoologów. Wyniki prezentowane przez biologów i zoologów, mogą stanowić tylko pewnego rodzaju wskazówkę do badań nad aerodynamiką trzepoczących skrzydeł. Ta grupa badaczy zajmowała się głównie szacowaniem zapotrzebowania energetycznego na lot, wykorzystując różne modele analityczne dostosowane do wyników pomiarów. Modele te są najczęściej jednak zbyt uproszczone, opisując niezbyt dokładnie quasi-stacjonarne modele aerodynamiczne, bardziej w sposób jakościowy niż ilościowy. Brak jest szczegółowych analiz,

Ryba

uwzględniających ilościowo zjawiska towarzyszące ruchowi trzepoczących skrzydeł w powietrzu.

Modele które mogłyby zostać wykorzystane do projektowania MAV z trzepoczącymi skrzydłami muszą uwzględniać skomplikowane zjawiska aerodynamiczne o niestacjonarnym i wirowym charakterze, towarzyszące ruchowi elastycznych skrzydeł. Punktem wyjścia do opracowania takich modeli mogą być badania aerodynamiki i fizyki lotu owadów i ptaków występujących w naturze. Jest to o tyle skomplikowane, że nawet wśród zwierząt latających z podobnymi zakresami liczb Reynoldsa, realizacja samego lotu może się bardzo różnić. W niektórych przypadkach pojedyncza para silnie odkształcalnych skrzydeł generuje intensywne wiry na krawędzi natarcia w fazie lotu postępowego lub w fazie zawisu. W innych przypadkach para przednich skrzydeł generuje wiry, które oddziałują na parę tylnych skrzydeł, dając korzystny efekt aerodynamiczny. Na podstawie obserwacji zoologicznych odkryto, że korzystnym efektem stykania się skrzydeł podczas cyklu trzepotania niektórych owadów jest wyjątkowo wysoki współczynnik siły nośnej.

Ilościowe opisanie zjawisk i określenie sił towarzyszących trzepotaniu odkształcalnych skrzydeł znacznie wykracza poza klasyczną analizę aerodynamiczną. Badania takich układów wymagają uwzględnienia między innymi zjawisk zarówno aerodynamiki niestacjonarnej, aeroelastyczności, mechaniki konstrukcji oraz biomechaniki. Sprawia to, że zagadnienie posiada złożony interdyscyplinarny charakter, wymagający uwzględnienia wiedzy inżyniersko-technicznej jak i biologicznej. Rozwiązania poszukuje się z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi inżynierskich z grupy obliczeniowej mechaniki płynów (CFD) oraz analiz strukturalnych z uwzględnieniem oddziaływania płynów (FSI). Analizę zachowania się skrzydeł w trakcie pracy wykonuje się z zastosowaniem metod inżynierii odwrotnej i skanowania 3D. Otrzymane wyniki i opracowane na ich podstawie modele powinny dać odpowiedź na kilka ważnych pytań, z punktu widzenia określenia poprawnych wymagań projektowych dla aparatów klasy MAV. Na przykład, które ruchy skrzydeł są naprawdę ważne z punktu widzenia wytwarzanego ciągu i siły nośnej? Jak ważna jest wielkość amplitudy i częstości ruchu skrzydeł? Jak wrażliwe jest optimum na małe odchylenia parametrów? Jakie wielkości mają wpływ na ciąg i siłę nośną? Czy można efektywnie sterować wielkością kąta nastawienia skrzydła (skok) w sposób pasywny, poprzez elastyczne jego odkształcenia, w interesującym zakresie prędkości?

Weryfikacja otrzymanych wyników powinna być przeprowadzana poprzez dalsze badania w tunelu aerodynamicznym oraz testy w locie. Innym sposobem przydatnym przy wyjaśnianiu zachowania aerodynamicznego małych trzepoczących skrzydeł, jest budowanie analogów mechanicznych. Takie urządzenie umożliwia wykonywanie pomiarów i wizualizacji przepływu w kontrolowany i powtarzalny sposób, dostarczając dalszych wskazówek przy opracowywaniu modeli analitycznych. Konieczne jest oczywiście dokładne odwzorowanie istotnych cech badanych skrzydeł. Jednak ważnym dodatkowym rezultatem takich badań jest konieczność

Ręka

dobrania materiałów i konstrukcji do analogu mechanicznego, stanowiąc pomost przy realizacji udanego aparatu MAV.

Dogłębne zrozumienie kinematyki i aerodynamiki skrzydeł ptaków i owadów może przynieść bardziej użyteczne wyniki niż tylko dokładne naśladowanie ruchów ich skrzydeł. W tym względzie kluczowe obszary badawcze obejmują dokładne modelowanie odkształcalnych skrzydeł membranowych oraz ocenę ich efektywności przy niskich liczbach Reynoldsa, w porównaniu ze sztywnymi skrzydłami trzepoczącymi. Na razie nie wiadomo również jaki powinien być optymalny kształt skrzydeł w powiązaniu z rozkładem sztywności wynikającym z ich konstrukcji.

W wymienionych aspektach tematyka podjęta w ramach rozprawy doktorskiej przez Panią Zuzannę Kunicką-Kowalską bardzo dobrze wpisuje się w cele i zakresy najnowszych badań nad aerodynamiką i fizyką lotu obiektów z trzepoczącymi skrzydłami. Zastosowanie zaawansowanych metod i narzędzi badawczych, takich jak inżynieria odwrotna, analizy CFD i FSI oraz badania doświadczalne modelu dynamicznie podobnego pozwoliły na identyfikację kinematyki ruchu skrzydeł wybranego motyla oraz analizę zjawisk aerodynamicznych temu towarzyszących. Pozwoliło to na określenie parametrów w sposób najistotniejszy wpływających na fizykę zjawisk aerodynamicznych towarzyszących trzepotaniu skrzydeł. Umożliwi to określenie w przyszłości wymagań dotyczących projektowania aparatów klasy MAV z trzepoczącymi skrzydłami oraz dopracowanie modeli obliczeniowych pozwalających na optymalizację parametrów MAV.

Ocena merytoryczna

Postęp techniczny w zakresie miniaturyzacji układów sterowania i komunikacji, dedykowanych systemom bezzałogowym klasy mikro umożliwił budowanie bardziej sprawnych i skutecznych MAV. Poniżej pewnej wielkości bezzałogowych aparatów latających, efektywniejszym sposobem wytwarzania siły ciągu i siły nośnej jest wykorzystanie trzepoczących skrzydeł, w stosunku do tradycyjnych śmigieł. Wymaga to jednak dokładnego poznania fizyki lotu aparatów z trzepoczącymi skrzydłami, aby można było poprawnie projektować i budować obiekty charakteryzujące się optymalnymi parametrami.

Do niedawna nie prowadzono szerszych badań nad aerodynamiką i fizyką lotu entomopterów ze względu na niewielkie perspektywy ich wykorzystania. Obecnie, ze względu na postęp techniczny, sytuacja się zmieniła. Obiekty w układzie entomopterów budzą szerokie zainteresowanie zarówno do zastosowań wojskowych jak i cywilnych. Pojawiła się więc pilna potrzeba uzupełnienia deficytu wiedzy w zakresie aerodynamiki i fizyki lotu tych obiektów w celu opracowania adekwatnych modeli obliczeniowych, możliwych do wykorzystania w procesie projektowania i optymalizacji. Naturalnym kierunkiem jest rozpoczęcie badań od rozwiązań istniejących w przyrodzie. Autorka pracy zdecydowała się na przeprowadzenie badań ruchu skrzydeł owada *Attacus atlas*, uważanego za największy żyjący dziś na świecie

gatunek motyla. Mimo, że jak w przypadku wielu innych rozwiązań istniejących w przyrodzie, sam motyl *Attacus atlas* oraz budowa i ruch jego skrzydeł posiadają swoją specyfikę, to jednak na podstawie przeprowadzonych badań Autorka mogła sformułować wiele wniosków o charakterze ogólnym.

Strona metodologiczna pracy nie budzi zastrzeżeń. Na podstawie studium literatury oraz wstępnych badań dotyczących „lotu trzepoczącego” Autorka sformułowała dwie hipotezy badawcze, dotyczące dwóch najistotniejszych kwestii związanych z fizyką lotu układów z trzepoczącymi skrzydłami. Testowanie postawionych hipotez wymagało opracowania planu badań, którego realizacja miała umożliwić osiągnięcie zidentyfikowanych celów badawczych i weryfikację postawionych hipotez. Zarówno plan badań jak i cele badawcze należy uznać za właściwe i kompletne. Zaplanowane badania i symulacje oraz testy laboratoryjne były niezbędne do osiągnięcia celów badawczych i potwierdzenia prawdziwości postawionych hipotez.

Wszystkie prace zaplanowane do realizacji w ramach pracy doktorskiej miały charakter badawczy, ukierunkowany na poszerzenie wiedzy na temat aerodynamiki i fizyki lotu aparatów z trzepoczącymi skrzydłami. Pierwszym etapem prac była obserwacja żywego osobnika w celu zidentyfikowania geometrii i kinematyki ruchu skrzydeł ćmy *Attacus atlas*. Dalsze prace prowadzone były z wykorzystaniem wirtualnych modeli odwzorowujących ruch trzepoczących skrzydeł, z uwzględnieniem różnych uproszczeń. Najpierw dla skrzydła sztywnego a następnie z uwzględnieniem jego odkształcalności. Charakterystyki mechaniczne skrzydła rzeczywistego motyla wyznaczono metodami doświadczalnymi, z wykorzystaniem specjalnie do tego celu zaprojektowanych i zbudowanych narzędzi. Ze względu na ograniczenia obliczeniowe zastosowanego narzędzia numerycznego, zakres badań został rozszerzony o badania laboratoryjne dynamicznie podobnego modelu skrzydła, zanurzonego w glicerynie. Wnioski ze wszystkich etapów badań pozwoliły na wykazanie prawdziwości pierwszej hipotezy oraz na częściowe wykazanie prawdziwości hipotezy drugiej. Zastosowane metody badawcze praktycznie w całości należą do grupy metod empirycznych, na które składały się badania eksperymentalne (żywy obiekt, dynamicznie podobny model skrzydła) oraz badania symulacyjne z zastosowaniem systemu Ansys Fluent i pakietu do analiz FSI.

W ramach analiz teoretycznych Autorka zidentyfikowała najważniejsze zjawiska fizyczne towarzyszące poruszaniu się trzepoczących skrzydeł z uwzględnieniem specyfiki motyla *Attacus atlas* oraz określiła parametry charakteryzujące ruch skrzydeł w postaci bezwymiarowych liczb podobieństwa. Pozwoliło to na scharakteryzowanie natury opisywanych zjawisk fizycznych oraz określenie dopuszczalnych uproszczeń umożliwiających łatwiejszy ich opis.

Zastosowanie metod inżynierii odwrotnej pozwoliło na precyzyjną identyfikację charakteru ruchu i kształtu skrzydeł w wybranych chwilach powtarzalnego ruchu trzepotania z uwzględnieniem występujących odkształceń. Do opisu dynamiki rotujących skrzydeł Autorka

zaproponowała klasyczne podejście polegające na wykorzystaniu równań ruchu Lagrange'a II rodzaju z niezbędnym uproszczeniem zakładającym nieruchomość korpusu owada. Zaproponowany model jest zgodny z modelem wykorzystanym w trakcie badań eksperymentalnych. Analizy przepływowe wykorzystują model płynu rzeczywistego którego ruch opisany jest równaniami Naviera-Stokesa. Przybliżone rozwiązanie równań Naviera-Stokesa odbywa się z wykorzystaniem komercyjnego systemu obliczeniowego Ansys Fluent w przypadku analizy przepływowej oraz pakietu Ansys Fluent i Mechanical w przypadku analiz FSI, uwzględniających oddziaływanie pomiędzy płynem i poruszającym się w nim odkształcalnym obiektem.

Analizy CFD pozwoliły na wstępne określenie zjawisk aerodynamicznych towarzyszących ruchowi skrzydeł trzepoczących, dla różnych modeli obliczeniowych. Wstępnie dokonano analizy przepływu wokół skrzydła sztywnego, wykonującego ruch trzepoczący z parametrami przyjętymi na podstawie pomiarów określonych dla żywego owada. Następnie wykonano analizy dla skrzydła odkształcalnego. Rozkład sztywności skrzydła został przyjęty na podstawie pomiarów dokonanych dla skrzydła martwego owada, z wykorzystaniem specjalnie zaprojektowanej i wykonanej maszyny wytrzymałościowej. Analizowane modele dawały coraz lepszą zgodność z obserwacjami (wielkości sił i odkształceń oraz ruch skrzydeł), lecz dla najbardziej zaawansowanego modelu, ograniczenia systemu numerycznego nie pozwoliły na przeprowadzenie badań w pełnym zakresie ruchu skrzydeł.

Pomimo tego, że dla najbardziej skomplikowanego modelu nie udało się przeprowadzić symulacji w pełnym zakresie ruchu, to uzyskane wyniki pozwoliły otrzymać bardzo cenne wnioski, ważne z punktu widzenia modelowania układów z trzepoczącymi skrzydłami na potrzeby projektowania aparatów klasy MAV w układzie entomoptera.

Ograniczone możliwości analiz numerycznych skłoniły Autorkę do wykonania eksperymentalnych badań laboratoryjnych dynamicznie podobnego modelu skrzydła, zanurzonego w glicerynie. Wybór ośrodka w którym przeprowadzono badania oraz materiału z którego wykonano model skrzydła został właściwie uzasadniony i nie budzi wątpliwości. Na podstawie wizualnej oceny stwierdzono dużą zgodność odkształceń poruszającego się skrzydła z odkształceniami obserwowanymi w naturze i uzyskanymi w trakcie analiz FSI.

Przedstawione przez Autorkę wyniki i wnioski stanowią ważny krok w kierunku poznania fizyki opływu elastycznych skrzydeł wykonujących ruch trzepoczący. Pozyskana wiedza już teraz pozwala na budowanie dokładniejszych modeli obliczeniowych, które będą mogły być wykorzystane w procesie projektowania i optymalizacji entomopterów klasy MAV.

Uwagi szczegółowe

Praca zawarta została na 164 stronach. Składa się 11 rozdziałów merytorycznych, wstępu, podsumowania oraz spisów rysunków i tabel, spisu literatury oraz trzech załączników.

Wstęp stanowi wprowadzenie w zagadnienia omawiane w pracy z krótką charakterystyką analizowanych problemów.

Rozdział drugi stanowi studium literatury, w którym Autorka dokonała przeglądu pozycji literaturowych dotyczących ogólnej budowy skrzydeł owadzich, aerodynamiki i mechaniki lotu skrzydeł elastycznych i sztywnych, charakterystyki lotu aparatów klasy MAV oraz badań z zakresu materiałoznawstwa skrzydeł owadzich. Autorka zidentyfikowała główne braki w obszarach wiedzy, z których najważniejsze to niedostatecznie zbadane właściwości mechaniczne skrzydeł owadzich oraz skąpa ilość analiz z zakresy aeroelastyczności skrzydeł trzepoczących.

Rozdział trzeci dotyczy specyfiki lotu trzepoczącego. W rozdziale tym Autorka dokonała analizy budowy skrzydeł motyla *Attacus atlas*, z określeniem rozłożenia i funkcji najważniejszych elementów strukturalnych. Autorka określiła również liczby podobieństwa charakteryzujące zjawiska towarzyszące ruchowi skrzydeł trzepoczących. W części końcowej omówione zostały najważniejsze zjawiska fizyki przepływu wokół trzepoczących skrzydeł.

W rozdziale czwartym Autorka omówiła wykorzystywane modele matematyczne, zarówno do opisy ruchu owada jak i opisu przepływu wokół ruchomych skrzydeł. Wykorzystane modele należą do grupy klasycznych modeli fizycznych, szeroko opisywanych w literaturze.

Rozdział piąty prezentuje zastosowaną metodologię badawczą. Sformułowano w nim dwie hipotezy badawcze, określono plan badań, zdefiniowano cele badawcze oraz określono schematy postępowania w przypadku obliczeń dotyczących skrzydła sztywnego i elastycznego. Rozdział szósty zawiera charakterystykę modeli wirtualnych do analiz FSI odwzorowujących rzeczywiste skrzydło przy różnych stopniach uproszczenia. Model najbardziej uproszczony zakładał stałą wartość modułu Younga, uśrednioną na podstawie badań skrzydła rzeczywistego oraz stałą grubość skrzydła. Model najbardziej złożony odwzorowywał rozkład sztywności uzyskanych na podstawie pomiarów wykonanych dla rzeczywistego skrzydła, symulując nierównomierne rozłożenie elementów strukturalnych. Wprowadzał on również różnicowanie grubości elementów strukturalnych skrzydła, z uwzględnieniem bardzo małej grubości błony (pokrycia) pomiędzy elementami strukturalnymi.

Rozdział siódmy opisuje część eksperymentalno-analityczną w której badany był ruch skrzydeł żywego motyla. Wykorzystując metody inżynierii odwrotnej uzyskano przemieszczenia wybranych punktów na skrzydle owada dla całego cyklu ruchu trzepoczącego. Metodą skanowania 3D określona została geometria zewnętrzna oraz rozłożenie elementów strukturalnych w rzeczywistym skrzydle motyla.

W rozdziale ósmym opisano badania wytrzymałościowe różnych skrzydeł owadzich oraz wybranych ich fragmentów. W celu wykonania badań opracowano specjalną maszynę wytrzymałościową, umożliwiającą przeprowadzenie prób zginania. Wykonując badania skrzydeł różnych owadów dla różnych poziomów wilgotności określono moduły Younga oraz

Rele

wpływ wilgotności na ich wartość. Otrzymane wyniki porównano z publikowanymi wartościami modułu Younga dla różnych materiałów w celu weryfikacji ich wartości.

W rozdziale dziewiątym zawarto analizę ruchu skrzydła sztywnego z wykorzystaniem systemu Ansys Fluent. Obliczenia wykonano dla ruchu skrzydła charakteryzowanego przemieszczeniami wybranego punktu, zmierzonymi w trakcie skanowania 3D żywego owada. Mimo, że analizowany model zawierał bardzo daleko idące uproszczenia, to jednak uzyskane wyniki dały wstępną informację o charakterze przepływu wokół skrzydła i występujących rozkładach ciśnień.

Rozdział dziesiąty omawia wyniki badań przeprowadzonych dla modelu zakładającego ustaloną, stałą wartość elastyczności, które jest niezależna od momentu bezwładności przekroju. Zakładając grubość skrzydła w strefie krawędzi natarcia i krawędzi spływu, wyliczono teoretyczne wartości modułu Younga dla strefy natarcia i dla strefy spływu. Ponieważ zastosowany model nie odwzorowywał rzeczywistej, bardzo zróżnicowanej struktury skrzydła, to otrzymane wyniki dawały niewłaściwe odkształcenia i nieprawidłowe rozkłady ciśnień.

Rozdział jedenasty prezentuje wyniki badań wykonanych z wykorzystaniem najbardziej złożonego modelu odwzorowującego rozkład elementów strukturalnych w trzepoczącym skrzydle. Model ten w porównaniu do modelu z rozdziału dziesiątego różni się tym, że został pocieniony w miejscach występowania tylko błony pokryciowej skrzydła. Ze względu na ograniczenia systemu obliczeniowego nie było możliwości analizy samego momentu zderzenia się skrzydeł w górnym położeniu. Otrzymane wyniki, choć niepełne, były na tyle dokładne, że pozwoliły na wyciągnięcie szeregu wniosków natury ogólnej, np. dotyczących najistotniejszych elementów struktury skrzydła owada, które mają wpływ na jego zachowanie podczas lotu. Wskazuje to na te elementy, które trzeba precyzyjnie dobrać na etapie projektowania aparatu MAV w układzie entomoptera.

Uzupełnienie niepełnych badań numerycznych stanowią badania eksperymentalne modelu dynamicznie podobnego, wykonującego ruch trzepoczący w glicerynie, opisane w rozdziale dwunastym. Badania te stanowiły walidację analiz FSI. Charakterystyka ruchu określona została na podstawie metod podobieństwa. Dynamicznie podobny model skrzydła wykonany został z silikonu formierskiego. Odwzorowując w sposób uproszczony strukturę nośną skrzydła i różnicując grubość poszczególnych elementów w celu otrzymania odpowiedniej sztywności uzyskano model rzeczywisty odpowiadający modelowi wirtualnemu opisanemu w rozdziale jedenastym. Wizualna ocena odkształceń i przemieszczeń wskazała, że pokrywają się one z wartościami zaobserwowanymi w naturze oraz wyznaczonymi w trakcie analiz FSI dla najbardziej zaawansowanego modelu.

Rozdział trzynasty zawiera podsumowanie badań zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej, z omówieniem najważniejszych uwag i wniosków końcowych. Rozdział zawiera również propozycje kierunków dalszych badań.

Załącznik 1 zawierają szczegółowe wyniki dotyczące geometrii rzeczywistego skrzydła motyla *Attacus atlas*, uzyskane metodami inżynierii odwrotnej w trakcie badań skrzydła żywego owada. Załącznik 2 zawiera stopnie obrotu skrzydła w punkcie wokół poszczególnych osi w trakcie ruchu trzepoczącego. Załącznik 3 zawiera kod programu sterującego skrzydłem w trakcie badań eksperymentalnych.

Spis literatury zawiera 87 pozycji, właściwie dobranych pod względem merytorycznym i aktualności prezentowanych informacji.

W aspekcie nowatorstwa pracy za szczególnie cenne uważam następujące jej elementy:

- identyfikację najważniejszych charakterystyk mechanicznych głównych elementów strukturalnych skrzydeł wybranych owadów, z określeniem wpływu wilgotności na moduł Younga;
- badania wirtualnych modeli trzepoczących skrzydeł z uwzględnieniem zjawisk aeroelastycznych, dla narastającej złożoności modeli, w celu identyfikacji cech modelu w sposób najistotniejszy wpływających na dokładność modelowania zachowania się skrzydła rzeczywistego;
- walidacja analiz numerycznych poprzez badania eksperymentalne modelu dynamicznie podobnego.

Ocena strony edytorskiej

Praca napisana jest językiem poprawnym i precyzyjnym. Strona edytorska pracy spełnia najwyższe przyjęte standardy. Układ pracy jest przejrzysty, a podział treści rozprawy na rozdziały i podrozdziały oraz ich kolejność, nie budzą zastrzeżeń. Terminologia i pojęcia stosowane w pracy są poprawnie zdefiniowane. Materiały ilustracyjne oraz tabele zamieszczone w pracy w sposób właściwy i logiczny uzupełniają opisywane treści.

Jedyna uwaga krytyczna dotyczy częściowego braku opisu oznaczeń wielkości występujących we wzorach w rozdziale 3 i 4. Brakuje również jednolitego wykazu oznaczeń użytych w całej pracy. Może to sprawiać problem w prawidłowym odbiorze i rozumieniu przedstawionych treści w wymienionych rozdziałach.

Konkluzje

Przedstawioną do recenzji pracę oceniam wysoko i uważam że została wykonana na bardzo wysokim poziomie merytorycznym. Zawarte w niej treści dotyczą złożonych problemów aerodynamiki i aeroelastyczności trzepoczących skrzydeł latających owadów, celem opracowania wymagań dotyczących modelowania i projektowania aparatów klasy MAV w układzie entomoptera. Treści merytoryczne zawarte w pracy świadczą o dużej dojrzałości naukowej i wiedzy merytorycznej Doktorantki.

Zaprezentowane w rozprawie wyniki badań są oryginalnym dorobkiem naukowym Doktorantki, a rezultaty pracy mogą zostać wykorzystane w praktyce. Zawarte w rozprawie badania i analizy są przeprowadzone na wysokim poziomie merytorycznym, a ich wyniki rozszerzają wiedzę z zakresu aerodynamiki i fizyki lotu obiektów latających w układzie entomoptera.

Reasumując, drobne uwagi krytyczne nie umniejszają wysokiej wartości merytorycznej pracy. Na uwagę zasługują następujące elementy:

- uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy, które wynika z wnikliwej analizy stanu wiedzy,
- trafne zdefiniowanie przedmiotu badań i celów rozprawy,
- wysoki poziom merytoryczny pracy i znajomość rozważanej tematyki,
- oryginalne i ciekawe wyniki badań empirycznych (symulacyjnych i eksperymentalnych),
- umiejętność korzystania z literatury naukowej,
- przejrzysta i logicznie ułożona struktura pracy oraz jej cele i zakres.

Biorąc pod uwagę istotność i aktualność tematyki pracy doktorskiej, osiągnięte wyniki badawcze a także ich duże znaczenie naukowe oraz praktyczne stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Zuzanny Kunickiej - Kowalskiej spełnia warunki merytoryczne i formalne stawiane pracom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Uwzględniając wysoki poziom merytoryczny rozprawy, w tym nowatorstwo i oryginalność przeprowadzonych prac badawczych oraz pozostały dorobek publikacyjny w skład którego wchodzi praca opublikowana w czasopiśmie (ACTA OF BIOENGINEERING AND BIOMECHANICS, IF=0.968), wnoszę do Wysockiej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o przyznanie wyróżnienia przedłożonej mi do oceny rozprawie doktorskiej Pani mgr. inż. Zuzanny Kunickiej - Kowalskiej.

Patrycja Andrusz