

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski
krzysztof.sibilski@pw.edu.pl
Politechnika Warszawska
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa
ul. Nowowiejska 24,
00-665 Warszawa

Warszawa, 2022-10-31

RECENZJA

rozprawy doktorskiej opracowanej przez Pana mgr inż. Jana Muchowskiego

nt.:

WPLYW PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH BEZZAŁOGOWEGO APARATU LATAJĄCEGO W UKŁADZIE ŻYRODYNY NA JEGO WYDATEK ENERGETYCZNY NIEZBĘDNY DO MONITORINGU INFRASTRUKTURY LINIOWO-PUNKTOWEJ

*wykonana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej
Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukaszewicza*

OCENA STRONY METODYCZNEJ

1. Układ rozprawy

Rozprawa doktorska obejmuje 191 stron maszynopisu, w tym 15 stron załączników, zawiera 169 rysunków i 18 tabel. Bibliografię stanowi 137 pozycji o znaczeniu poznawczym i technicznym, obejmujących materiał badawczy rozprawy.

Przedmiotem pracy doktorskiej mgr inż. Jana Muchowskiego były kompleksowe badania eksperymentalno – numeryczne dotyczące wpływu parametrów konstrukcyjnych bezzałogowego statku powietrznego (BSP) w układzie girdyny na wydatek energetyczny niezbędny do wykonania przez ten statek powietrzny misji monitorowania linii energetycznych, gazociągów czy też linii kolejowych - czyli tzw. infrastruktury liniowo-punktowej.

Tematyka rozprawy dotyczy ważnego zagadnienia zwiększenia efektywności BSP charakteryzujących się pionowym startem i lądowaniem oraz możliwością wykonywania zawisu. Doktorant słusznie zauważył, że zapotrzebowanie na nowe, efektywniejsze rozwiązania BSP ciągle rośnie. Jednym z istotnych cywilnych zastosowań BSP jest wykorzystanie ich do misji monitorowania linii wysokiego napięcia, gazociągów czy też linii kolejowych. Misje te

składają się zasadniczo z dwóch faz lotu: zawisu w punktach charakterystycznych, takich jak np. słupy wysokiego napięcia i lotu poziomego pomiędzy tymi punktami. BSP w stosowanych dotychczas układach aerodynamicznych nie charakteryzują się wystarczającymi osiąganiami, co stanowi barierę w ich zastosowaniach w misjach monitoringu infrastruktury liniowo-punktowej. Doktorant w swojej pracy chciał wykazać, że rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie dotychczas nie wykorzystanego w konstrukcji BSP układu aerodynamicznego girodyny. Doktorant na podstawie przeprowadzonego studium literatury wykazał, że brak jest dostępnych danych na temat kształtowania aerodynamicznego małej, bezzałogowej girodyny wykonującej lot na zakresie niskich liczb Reynoldsa oraz małych wartości posuwu wirnika nośnego. W swojej pracy Doktorant starał się odpowiedzieć na pytanie, czy wydatek energetyczny girodyny przekładający się na czas i zasięg lotu jest lepszy w porównaniu do obecnie stosowanych w tego typu BSP rozwiązań.

Kandydat w ramach pracy przeprowadził badania charakterystyk aerodynamicznych. Badania te zostały przeprowadzone dwutorowo: doświadczalnie w tunelu aerodynamicznym, oraz za pomocą symulacji metodami cyfrowej mechaniki płynów.

Badania te koncentrowały się na określeniu wpływu położenia oraz kąta zaklinowania skrzydeł na charakterystyki energetyczne lotu poziomego oraz zawisu girodyny.

Badania w tunelu aerodynamicznym Doktorant wykonał na specjalnie w tym celu zaprojektowanym i zbudowanym modelu BSP. Symulacje numeryczne wykonał w programie Fluent z wykorzystaniem modelowania wirników nośnych za pomocą modułu VBM. Należy podkreślić, że wyniki analiz numerycznych były zbieżne z badaniami eksperymentalnymi oraz pozwoliły na szczegółową analizę zjawiska interferencji skrzydła i autorotacyjnego wirnika girodyny.

Reasumując uważam, że opracowanie mgr inż. Jana Muchowskiego jest oryginalne i wnosi wartościowe elementy w nurt badań nad aerodynamiką wiroplątów.

Przyjmując, że rozdziały od 4 do 7 (łącznie 117 stron) stanowią zasadniczą część rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że proporcje pomiędzy jej częściami merytorycznymi są prawidłowe. Treść pracy nawiązuje w sposób właściwy do jej tytułu, a nazwy rozdziałów przedstawiają spójną całość, dając syntetyczny pogląd na rozważaną treść.

2. Metoda opracowania

Ze względów metodycznych całość rozprawy można podzielić na:

Część metodologiczną, obejmującą rozdziały 1, 2 i 3 (29 stron), w której Autor przedstawił genezę podjętych badań, ocenił stan wiedzy dotyczący zakresu merytorycznego rozprawy, oraz

określił przedmiot, zakres, cele i tezę pracy. Celem podjętych badań było przeprowadzenie serii badań eksperymentalnych oraz symulacji metodami CFD girodyny.

Historycznie rzecz biorąc, powodem, dla którego powstał w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku układ girodyny była chęć zwiększenia prędkości przelotowej oraz zasięgu śmigłowców. Należy podkreślić, że istotny wpływ na charakterystyki zawisu oraz autorotacyjnego lotu poziomego girodyny mają zjawiska interferencji aerodynamicznej, a skala wzajemnego oddziaływania podzespołów na te charakterystyki zależy od konfiguracji girodyny. Zatem, aby móc porównać zapotrzebowanie energetyczne układu girodyny z innymi układami BSP niezbędne jest uzyskanie wiedzy na temat wpływu parametrów geometrycznych i konfiguracji głównych elementów girodyny na jej charakterystyki aerodynamiczne we wszystkich fazach lotu. Na podstawie analizy dostępnej literatury Doktorant stwierdził, że spośród analizowanych układów BSP, układ girodyny może w pełni zrealizować misję oblotu infrastruktury liniowo-punktowej i sformułował następującą tezę rozprawy doktorskiej:

„Układ aerodynamiczny żyrodyny ma najniższe zapotrzebowanie energetyczne do lotu z obecnie stosowanych układów BAL realizujących misję oblotu infrastruktury liniowo-punktowej”.

Na podstawie przeprowadzonej w Rozdziale 2 analizy stanu wiedzy Doktorant stwierdził, że brak jest istotnych opracowań dotyczących metod obliczeniowych oraz danych eksperymentalnych związanych z modelowaniem aerodynamiki BSP w układzie girodyny. Szczególnie dotyczyło to zakresu małych prędkości przelotowych (posuwów wirnika nośnego) oraz odpowiadających im niskich wartościach liczb Reynoldsa. Doktorant zidentyfikował następujące problemy badawcze:

- analiza wpływu położenia oraz kąta zaklinowania skrzydła względem wirnika nośnego na charakterystyki zawisu,
- analiza wpływu położenia oraz kąta zaklinowania skrzydła względem wirnika nośnego na charakterystyki lotu poziomego z wirnikiem w stanie autorotacji dla zakresów posuwów wirnika $\mu = 0,2 \div 0,3$,
- analiza wpływu napędów marszowych na charakterystyki aerodynamiczne w locie poziomym z wirnikiem w stanie autorotacji,
- porównanie zapotrzebowania energetycznego układów konstrukcyjnych BSP z możliwością pionowego startu i lądowania oraz zawisu (VTOL) z zapotrzebowaniem energetycznym girodyny.

W celu udowodnienia tezy rozprawy Doktorant zrealizował następujące zadania:

- opracował projekt i wykonał model do badań eksperymentalnych w tunelu aerodynamicznym;
- przeprowadził badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym modeli w następujących układach: izolowany kadłub, samolot, wiatrakowiec, śmigłowiec, girodyna;
- wykonał symulacje numeryczne charakterystyk aerodynamicznych układu aerodynamicznego śmigłowca oraz girodyny;
- dokonał weryfikacji modelu numerycznego w oparciu o wyniki badań eksperymentalnych;
- przeprowadził analizę wpływu badanych parametrów geometrycznych girodyny na jej charakterystyki aerodynamiczne w analizowanych konfiguracjach aerodynamicznych;
- dokonał wyboru konfiguracji girodyny, która charakteryzowała się najkorzystniejszymi własnościami aerodynamicznymi z punktu widzenia realizowanej misji;
- porównał zapotrzebowania energii niezbędnej do realizacji misji oblotu infrastruktury liniowo-punktowej dla wybranej konfiguracji układu girodyny i śmigłowca.

W celu porównania zapotrzebowania energetycznego, niezbędnego do realizacji misji monitoringu infrastruktury liniowo-punktowej żyrodyny, spośród obecnie stosowanych układów konstrukcyjnych BSP, wybrany został układ śmigłowca. Wybór ten wynikał z analizy danych literaturowych.

Przyjęta przez Doktoranta metodyka badań charakterystyk aerodynamicznych układu girodyny zakładała, że w pierwszej kolejności zostaną przeprowadzone badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym, a potem wykonane zostaną badania numeryczne. Wynikało to z konieczności weryfikacji metod numerycznych już we wczesnej fazie wykonywania obliczeń. Badania w tunelu aerodynamicznym skupiały na pomiarach globalnych charakterystyk aerodynamicznych z pominięciem zagadnień równowagi oraz trymowania wirnika dla modelu w układzie śmigłowca, wiatrakowca oraz girodyny. Oznacza to, że pomiar sił i momentów odbywał się dla kompletnego układu wiatrakowca oraz girodyny w różnych konfiguracjach. Dostępne zaplecze badawcze nie pozwalało bowiem na pomiar sił i momentów generowanych przez poszczególne elementy składowe modelu. (np. skrzydło lub wirnik nośny żyrodyny).

Modele do badań tunelowych w układzie śmigłowca oraz girodyny miały postać uproszczoną. Ze względu na ograniczenia techniczne oraz czasowe w badaniach eksperymentalnych Kandydat zrezygnował z modelowania śmigła ogonowego (śmigłowiec), napędów marszowych oraz usterzenia (girodyna). Modele śmigłowca i girodyny w celu ich bezpośredniego porównania mają taki sam kadłub oraz wirnik nośny.

Badania tunelowe miały na celu:

1. Wyznaczenie wpływu zmian parametrów geometrycznych modelu girdyny na jej charakterystyki aerodynamiczne.
2. Pomiar charakterystyk aerodynamicznych układu śmigłowca oraz girdyny, tak aby możliwe było ich wykorzystanie do obliczeń zapotrzebowania energetycznego dla przykładowej misji monitoringu obiektów liniowo-punktowych realizowanych dla tych układów.
3. Zbadanie charakterystyk aerodynamicznych pośrednich układów modelu (kadłuba izolowanego, kadłuba ze skrzydłem (samolot) i wiatrakowca w celu wyznaczenia interferencji pomiędzy skrzydłem a wirnikiem autorotacyjnym.
4. Zbadanie charakterystyk aerodynamicznych kadłuba modelu w celu wyznaczenia współczynnika siły ciągu wirnika autorotacyjnego. Współczynnik ciągu liczony będzie jako różnica pomiędzy wartościami sił dla wiatrakowca (kadłub + wirnik) i sił kadłuba.
5. Wykorzystanie zmierzonych charakterystyk aerodynamicznych układów: kadłuba, samolotu, śmigłowca i wiatrakowca do weryfikacji poprawności przyjętej przez autora i opisanej w rozdziale 6 metodyki obliczeń charakterystyk aerodynamicznych przy pomocy oprogramowania CFD.

W drugim etapie badań Doktorant wykonał analizy CFD. Symulacje numeryczne wykonywał z użyciem modelu VBM w systemie ANSYS Fluent. Wybór VBM jako modelu pośredniego pomiędzy prostym modelowaniem wirnika, jako skoku ciśnienia, a pełnym modelowaniem geometrii wirnika podyktowany był ograniczeniami dostępnej mocy obliczeniowej i czasu maszynowego. Takie podejście jest moim zdaniem w pełni uzasadnione i poprawne. Badania numeryczne miały 3 cele:

1. Sprawdzenie, czy relatywnie prosty sposób modelowania wirników nośnych przy pomocy modułu VBM, daje wiarygodne wyniki w przypadku obliczeń charakterystyk układu girdyny. Do oceny tej posłużyły wyniki badań eksperymentalnych. Dlatego też modele numeryczne musiały odpowiadać w jak największym stopniu modelom tunelowym.
2. Zbadanie wpływu pracy napędów marszowych umieszczonych na końcówkach skrzydeł na charakterystyki aerodynamiczne girdyny w locie poziomym.
3. Zbadanie charakterystyk aerodynamicznych śmigłowca w locie poziomym.

Po pozytywnej weryfikacji użytej metody numerycznej uzyskane za jej pomocą charakterystyki aerodynamiczne układu śmigłowca oraz girdyny były użyte do obliczeń ich osiągnięć dla lotu poziomego oraz zawisu. Na podstawie obliczonych osiągnięć Doktorant wyznaczył

i porównał zapotrzebowanie energetyczne układu śmigłowca i girdyny dla hipotetycznej misji oblotu infrastruktury liniowo-punktowej.

Na podstawie powyższego stwierdzam, że Doktorant podjął się opracowania schematu działań prowadzących do opracowania metodyki obliczeń aerodynamicznych girdyny. Uważam, że mgr inż. Jan Muchowski taką metodykę opracował.

Część doświadczalną i teoretyczno – obliczeniową obejmującą rozdziały od 4 do 7 (117 stron), w której Doktorant opisał obiekt badań – girdynę wraz z układem pomiarowym, przedstawił wyniki badań doświadczalnych, założenia modelu symulacyjnego wraz z wynikami obliczeń metodami Cyfrowej Mechaniki Płynów.

Kandydat szczegółowo opisał przeprowadzone przez siebie badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym oraz symulacje wykonane metodami Cyfrowej Mechaniki Płynów, w tym przedstawił:

- konstrukcję i wyposażenie pomiarowe stanowiska badawczego;
- opis modeli użytych do badań w tunelu aerodynamicznym;
- wyniki pomiarów różnych konfiguracji modelu, tj. izolowanego kadłuba, samolotu (a właściwie układu kadłub – skrzydło czyli tzw. „wing – body configuration”), wiatrakowca, śmigłowca, oraz girdyny;
- analizę i dyskusję otrzymanych wyników;
- ogólny opis analiz numerycznych CFD, w tym: sposób przygotowania modelu geometrycznego i generowania siatek obliczeniowych, uzasadnienie wyboru modułu VBM pakietu Fluent, ustalenie warunków brzegowych oraz zakresu eksperymentów numerycznych;
- wyniki symulacji numerycznych;
- analizę i dyskusję wyników badań numerycznych;
- porównanie wydatku energetycznego układu śmigłowca i girdyny;
- opis projektu, konstrukcję (praktyczną realizację demonstratora lotu girdyny) i wyniki badań w locie demonstratora BSP w układzie girdyny (w załączniku nr. 1).

Całość pracy kończy **podsumowanie**, w którym Doktorant odniósł się do własnych dokonań naukowych, porównał wyniki symulacji numerycznych z rezultatami badań eksperymentalnych, formułując wnioski wraz z krytyczną analizą wyników.

Reasumując stwierdzam, że podjęty przez Doktoranta problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, jak i głębi prowadzonych rozważań, analiz, obliczeń i badań laboratoryjnych w tunelu aerodynamicznym. Z punktu widzenia określonych celów, przyjęta koncepcja badań jest w pełni uzasadniona, a zastosowane

narzędzia i metody badawcze są do niej adekwatne. Stwierdzam, że zarówno materiał badawczy, jak i literaturowy został przez Doktoranta rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta np. w poznanie technik pomiarów aerodynamicznych oraz modelowania złożonych obiektów aeromechanicznych, a w szczególności wiroplątów.

3. Metoda wykładu

Rozprawa doktorska mgr inż. Jana Muchowskiego obejmuje 191 stron maszynopisu, w tym 15 stron załączników, zawiera 169 rysunków i 18 tabel. Bibliografię stanowi 137 pozycji o znaczeniu poznawczym i technicznym, obejmujących materiał badawczy rozprawy. Rysunki oraz wykresy wykonane są czytelnie i jednoznacznie oraz są logicznie wplecione w treść wykładu. Ułatwia to zrozumienie prezentowanych przez Autora rozważań. Treści poszczególnych rozdziałów właściwie wynikają po sobie, tworząc spójną całość.

Uważam przy tym, że pod względem metodycznym praca zawiera następujące:

A. Niedociągnięcia

Zasadniczo nie dostrzegłem większych niedociągnięć pracy doktorskiej mgr inż. Jana Muchowskiego. Doktorant nie ustrzegł się drobnych pomyłek tzw. „literówek”. Zauważyłem kilka błędów w numeracji rysunków, i tak na str. 117 jest podwójna numeracja rysunku (rys. 5.5 występuje już na stronie 86). Prawdopodobnie na stronie 117 powinien znaleźć się rysunek z numerem Rys. 5.48. Ponadto Autor używa określenia „Bezzałogowy Aparat Latający (BAL)”. Jest to dość popularne w Polsce określenie bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Czasami autorzy publikacji unikają określenia „statek powietrzny” w odniesieniu do małych lub bardzo małych obiektów latających. Jednakowoż, poprawnym określeniem jest bezzałogowy statek powietrzny (BSP). Podobnie uważam, że poprawnym określeniem jest „girodyna” a nie „żyrodyna”, ze względu na grecki źródłosłów tego określenia.

B. Zalety

- Obszerny zakres problemowy pracy dający pogląd na ważność podjętej tematyki, oraz dogłębne studium przedmiotu pracy zawarte w rozdziałach 1, 2 i 3.
- Zaprojektowane i zbudowane przez mgr inż. Jana Muchowskiego unikalnego stanowiska badawczego do badania charakterystyk aerodynamicznych śmigłowca, girdyny oraz układu kadłub – skrzydło. Stanowisko to zostało wyposażone w zaprojektowaną przez Doktoranta aparaturę sterującą i pomiarową. Na szczególną uwagę zasługuje bardzo

przemysłany i świetnie zaprojektowany wielofunkcyjny model girodyny. Szczególnie trudnym elementem tego modelu jest głowica wirnika nośnego.

- Wykonanie serii pomiarów w tunelu aerodynamicznym układów: kadłub, skrzydło kadłub, śmigłowca i girodyny.
- Porównanie wyników pomiarów.
- Przygotowanie modelu geometrycznego girodyny do analizy numerycznej z wykorzystaniem komercyjnego oprogramowania Fluent, firmy Ansys. Do modelowania wirników nośnych wykorzystano wirtualny model łopaty (ang. Virtual Blade Model - VBM).
- Przedstawienie i analiza wyników symulacji numerycznych.
- Uzyskanie ciekawych wyników przeprowadzonych badań i obliczeń numerycznych dokumentujących efektywność zaproponowanego rozwiązania BSP w układzie girodyny.
- Praktyczna weryfikacja badań tunelowych i symulacji CFD badaniami w locie zaprojektowanego i wykonanego przez doktoranta BSP w układzie girodyny.
- Opracowanie i wykonanie demonstratora losu BSP w układzie girodyny.

Należy przy podkreślić, że przeprowadzone przez mgr inż., Jana Muchowskiego badania, obliczenia i analizy stanowią zarazem genezę pracy, a także uwypuklają nowe elementy opracowanego przez Doktoranta innowacyjnego rozwiązania BSP w układzie girodyny.

OCENA STRONY MERYTORYCZNEJ

Zasadniczym przedmiotem pracy było wykonanie serii badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych opracowanego przez Doktoranta innowacyjnego układu aerodynamicznego BSP – girodyny. Na podstawie analizy dostępnych publikacji uważam, że zaproponowane przez mgr inż. Jana Muchowskiego rozwiązanie konstrukcyjne jest oryginalne i spełnia kryterium podane w artykule 13 p. 1 i p.3 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. (z późn. zmianami) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach tytule w zakresie sztuki. Opracowana przez Doktoranta koncepcja i opisana w pracy realizacji układu girodyny stanowi moim zdaniem innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne. Istotną częścią pracy jest stanowisko przeznaczone do badań girodyny w tunelu aerodynamicznym oraz przeprowadzone na nim kompleksowe badania tego rozwiązania. Kandydat przedstawił wyniki badań różnych konfiguracji modelu, tj. kadłuba, układu skrzydło – kadłub, śmigłowca, wiatrakowca i girodyny. Mgr inż. Jan Muchowski przedstawił dogłębną analizę wyników przeprowadzonych w tunelu aerodynamicznym badań. W części numerycznej Doktorant przedstawił przygotowanie modelu

geometrycznego, dobór typu i sposoby generowania siatek obliczeniowych oraz uzasadnił wykorzystanie modułu VBM systemu Fluent.

Doktorant zaznaczył w pracy, że badania numeryczne nie miały na celu sprawdzenie, czy przyjęta metodyka obliczeń charakterystyk aerodynamicznych girdyny jest wiarygodna i czy może służyć do względnie szybkiego wyznaczania jej charakterystyk. Dodatkowym celem badań numerycznych było dokładniejsze zbadanie zjawiska interferencji aerodynamicznej skrzydła oraz wirnika autorotacyjnego. W pomiarach tunelowych, ze względu na pomiar jedną wagą aerodynamiczną całego modelu, można było wyznaczyć charakterystyki globalne badanych układów. Dzięki analizom CFD Doktorant wyznaczył udział siły nośnej skrzydła w sile całkowitej generowanej przez układ wirnik-skrzydło. Dodatkowo, dzięki wykorzystaniu analiz CFD, zbadał wpływ pracy napędów marszowych na charakterystyki układu girdyny. Badania w tunelu aerodynamicznym pozwoliły Kandydatowi na zweryfikowanie wyników badań numerycznych. W efekcie możliwe było wiarygodne obliczenie zapotrzebowania energetycznego układu śmigłowca i girdyny do realizacji hipotetycznej misji monitorowania infrastruktury liniowo-punktowej. Wyniki obliczeń zapotrzebowania energetycznego niezbędnego do realizacji misji monitoringu infrastruktury liniowo punktowej potwierdziły tezę pracy:

„Układ aerodynamiczny żyrodyny ma najmniejsze, niezbędne zapotrzebowanie energetyczne od obecnie stosowanych układów BAL do wykonania misji oblotu infrastruktury liniowo - punktowej”.

Doktorant wykazał zatem, że teza ta jest prawdziwa dla układu girdyny z mechanizmem zmiany kąta zaklinowana skrzydeł do 90 stopni w zawisie, dla misji o stosunku czasu zawisu do czasu lotu poziomego równej 0,5 i prędkości przelotowej 15 m/s. Dla misji, gdzie stosunek czasu lotu poziomego do czasu zawisu wynosi mniej niż 0,2 girdyna bez takiego mechanizmu ma również mniejsze, w porównaniu ze śmigłowcem zapotrzebowanie energetyczne do wykonania analizowanej misji.

Po zapoznaniu się z treścią pracy chciałbym podjąć polemikę z Autorem nad zaprezentowanymi przez niego wybranymi rozważaniami i opiniami. I tak:

- Uważam, że celowe byłoby przeprowadzenie badań układu girdyny przy użyciu bardziej zaawansowanych modeli numerycznych (np. pełne modelowanie geometrii łopat wirnika).
- Uważam, że celowe byłoby uwzględnienie modelu masowego oraz sprawności układów napędowych wirnika nośnego, śmigła ogonowego, napędów marszowych w

obliczeniach zapotrzebowania energetycznego niezbędnego do wykonania misji dla układu girdyny i śmigłowca.

- Interesująca byłaby szczegółowa analiza wpływu pracy napędów marszowych na charakterystyki układu girdyny
- Celowa byłaby analiza wpływu zmian parametrów geometrycznych skrzydła na równowagę podłużną oraz stateczność układu girdyny.
- Celowe byłoby porównanie efektywności energetycznej girdyny z efektywnością powszechnie stosowanych w misjach monitoringu wielowirnikowych wiroplatach.
- Proszę wyjaśnić, dlaczego metoda VLM ma ograniczenia w stosunku do wirników mocno obciążonych (pracujących na dużych wartościach skoku ogólnego).

PODSUMOWANIE

Przedstawiona do recenzji praca jest ciekawa i nowatorska. Autor wykazał się orientacją w badanej problematyce. Potrafił wyodrębnić najistotniejsze problemy badawcze oraz określić sposoby i metody adekwatne do ich rozwiązania.

Uważam, że osiągnięciami Doktoranta są

- opracowanie innowacyjnego BSP w układzie girdyny;
- opracowanie i wykonanie unikalnego stanowiska badawczego;
- przeprowadzenie szeregu badań eksperymentalnych i symulacyjnych wykazujących efektywność zaproponowanego układu aerodynamicznego BSP;
- uzyskanie szeregu bardzo interesujących i wartościowych wyników badań doświadczalnych w tunelu aerodynamicznym;
- przeprowadzenie eksperymentalnej walidacji modeli symulacyjnych umożliwiających wykorzystanie symulacji metodami CFD w procesie projektowania BSP w układzie girdyny;
- przeprowadzenie badań w tunelu aerodynamicznym oraz symulacji metodami CFD dowodzących, że położenie skrzydła oraz kąt jego zaklinowania względem wirnika nosnego mają istotny wpływ na charakterystyki girdyny w zawisie oraz w locie poziomym;
- wykazanie, że skrzydło girdyny opływane strumieniem zawirnikowym pogarsza jej charakterystyki zawisu, generując siłę skierowaną przeciwnie do siły ciągu wirnika. Wykazanie, że im większa jest odległość pionowa skrzydła od płaszczyzny wirnika, tym negatywny wpływ skrzydła na współczynnik ciągu oraz sprawność wirnika jest mniejszy;

- wykazanie, że zmniejszenie negatywnego wpływu skrzydła na charakterystyki zawisu można osiągnąć, przesuując skrzydło w poziomie tak, aby jak najmniejsza jego powierzchnia znajdowała się pod wirnikiem;
- wykazanie na podstawie badań w tunelu aerodynamicznym i symulacji CFD, że zmniejszenie powierzchni skrzydła w napływie od góry jest najefektywniejszym sposobem ograniczenia negatywnego wpływu skrzydła girodyny na charakterystyki jej zawisu;
- wykazanie, że zmniejszenie powierzchni skrzydła pod wirnikiem można osiągnąć również poprzez zmianę kąta zaklinowania z 0° na 90° ;
- wykazanie, że skrzydło znacząco poprawia doskonałość aerodynamiczną układu girodyny.
- wykazanie, że doskonałość układu girodyny zależy od położenia oraz kąta zaklinowania skrzydła względem osi wirnika;
- wykazanie, że obecność skrzydła zmniejsza prędkość obrotową wirnika, a co za tym idzie, zwiększa zakres posuwów, w jakich wirnik może pracować;
- wykazanie na podstawie symulacji CFD z wykorzystaniem modułu VBM są zbieżne z wynikami badań tunelowych, zarówno dla badań fazy zawisu jak i lotu poziomego, z wyjątkiem obliczeń zawisu dla dużych wartości kąta skoku ogólnego;
- zastosowanie napędów marszowych na końcówkach skrzydeł powoduje zwiększenie doskonałości układu girodyny w stosunku do girodyny bez napędów marszowych;
- wykazanie wyższej efektywności energetycznej girodyny niż śmigłowca w misjach monitoring infrastruktury liniowo – punktowej.

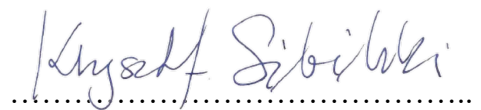
Bez wątpienia praca doktorska została wykonana samodzielnie i wnosi wkład w rozwój badań nad aerodynamiką bezzałogowych wiroplątów klasy mini. Wiedza zdobyta na podstawie analiz wyników uzyskanych z przeprowadzonych przez Doktoranta eksperymentów pozwoliła na weryfikację modeli obliczeniowych metodami CFD. Z kolei programy obliczeniowe pozwalają na analizę nowoprojektowanych bezzałogowych mini wiroplątów. Należy podkreślić, że wyniki badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej mgr inż. Jana Muchowskiego znalazły zastosowanie w projekcie bezzałogowego statku powietrznego w układzie girodyny, który został wykonany i oblatany. Badania w locie potwierdziły wysoką efektywność energetyczną układu girodyny w misjach monitoringu infrastruktury liniowo-punktowej.

WNIOSEK KOŃCOWY

Reasumując uważam, że recenzowana rozprawa została poprawnie skonstruowana pod względem merytorycznym i językowym. Uwzględniając osiągnięte wyniki badań, rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Zawartość rozprawy świadczy o bardzo dobrym przygotowaniu Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Stwierdzam zatem, że praca doktorska mgr. inż. Jana Muchowskiego pt. *„Wpływ parametrów konstrukcyjnych bezzałogowego aparatu latającego w układzie żyrodynny na jego wydatek energetyczny niezbędny do monitoringu infrastruktury liniowo-punktowej”* spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 13.1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym w zakresie sztuki (Dz.U. nr. 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). W związku z tym wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Biorąc po uwagę innowacyjność opracowanego przez Doktoranta BSP w układzie żyrodynny, oraz zakres i jakość przeprowadzonych badań w tunelu aerodynamicznym i symulacji komputerowych, oraz uwzględniając bardzo wysoki potencjał aplikacyjny pracy wnioskuję o jej wyróżnienie.



.....

prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski