

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Sibilski  
[ksibilski@pw.meil.edu.pl](mailto:ksibilski@pw.meil.edu.pl); [sibilski@hot.pl](mailto:sibilski@hot.pl)  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa  
Instytut Techniki Lotniczej i Mechaniki Stosowanej  
Zakład Mechaniki  
00-001 Warszawa  
ul. Nowowiejska 24

Warszawa, 2016-02-10

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej opracowanej przez Pana mgr inż. Tomasza Muszyńskiego

nt.:

### CHARAKTERYSTYKI ŚMIGŁA OBUDOWANEGO ZE STEROWANIEM CIĄGIEM ZA POMOCĄ PIERŚCIENIA O ZMIENNEJ GEOMETRII

*wykonana na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukaszczyka*

#### OCENA STRONY METODYCZNEJ

##### 1. Układ rozprawy

Rozprawa doktorska obejmuje 132 strony maszynopisu, w tym 11 stron załączników, zawiera 1105 rysunków i 22 tabele. Bibliografię stanowi 112 pozycji o znaczeniu poznawczym i technicznym, obejmujących materiał badawczy rozprawy.

Przedmiotem pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Muszyńskiego były kompleksowe badania obudowanego śmigła z ciągiem sterowanym za pomocą pierścienia o zmiennej geometrii. Tematyka rozprawy dotyczy ważnego zagadnienia zwiększenia efektywności zespołów napędowych statków powietrznych, a w szczególności śmigieł otunelowanych. Analiza bazy publikacji Amerykańskiego Instytutu Aeronautyki i Astronautyki - Aerospace Research Central (ARC) wykazuje ponad 500 publikacji poświęconych aerodynamice śmigieł obudowanych. Można zatem stwierdzić, że podjęta przez Kandydata tematyka badań jest aktualna i ważna nie tylko z naukowego ale także utylitarne punktu widzenia.

Kandydat przedstawił koncepcję i sposób realizacji układu dyszowego o zmiennej geometrii opartego o rozwiązanie biomimetyczne. Następnie zaprojektował i wykonał stanowisko doświadczalne do badań w tunelu aerodynamicznym i przeprowadził serię badań ekspery-

talnych dla 32 różnych konfiguracji geometrii obudowy śmigła. Wyniki badań dla śmigła otunelowanego zostały porównane z charakterystykami śmigła otwartego o tej samej geometrii jak w wirniku obudowanym. Po przeprowadzeniu badań w tunelu aerodynamicznym Kandydat przedstawił dogłębną analizę wyników eksperymentu wraz analizą błędów pomiarowych. Badania eksperymentalne zostały rozszerzone o symulacje przeprowadzone metodami CFD. W części numerycznej Kandydat opisał sposób:

- przygotowania modelu geometrycznego,
- doboru typu i generacji siatek obliczeniowych,
- doboru modeli turbulencji.

Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone dla dwóch przypadków geometrii pierścienia. Wyniki obliczeń porównano z danymi doświadczalnymi.

W świetle analizy światowej literatury zagadnienia uważam, że opracowanie mgr inż. Tomasz Muszyńskiego jest oryginalne i wnosi wartościowe elementy w nurt badań nad aerodynamiką śmigieł otunelowanych.

Przyjmując, że rozdziały 2 i 3 10 (59 stron) stanowią zasadniczą część rozprawy, 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 rozdział 1 (36 stron), w której Autor przedstawił genezę podjętych badań, ocenił stan wiedzy dotyczący zakresu merytorycznego rozprawy, oraz określił przedmiot, zakres, cele i tezy pracy. Celem podjętych badań było przeprowadzenie serii badań eksperymentalnych oraz symulacji metodami CFD śmigła otunelowanego z ciągiem sterowanym za pomocą pierścienia o zmiennej geometrii. Najistotniejszym problemem naukowym było oszacowanie, (na podstawie przeprowadzonych eksperymentów w tunelu aerodynamicznym, oraz symulacji numerycznych), wpływu zmiany geometrii tunelu wylotowego na prędkość napływu powietrza na śmigło-wentylator, co jest kluczowym zagadnieniem w ocenie efektywności tego rodzaju napędu. Doktorant postawił następujące tezy rozprawy: „możliwe jest zbudowanie obudowy śmigła o zmiennej geometrii, która dla małych posuwów będzie posiadała cechy śmigła obudowanego z dyszą przyspieszającą, natomiast po zmianie konfiguracji będzie posiadała cechy śmigła obudowanego z dyszą opóźniającą”; oraz „Zastosowanie zmiennej geometrii obudowy śmigła pozwoli na uzyskanie większego ciągu dla wa-



runków statycznych i małych posuwów oraz poprawę sprawności dla większych posuwów, w szczególności uzyskanie ciągu dla posuwów większych niż maksymalne dla śmigła otwartego, dla założonego stałego skoku śmigła”.

Celami podjętych przez Doktoranta prac były:

- Przegląd literatury związanej z tematyką pracy, zapoznanie się z pracami prowadzonymi w dziedzinie śmigieł obudowanych ze sterowanym ciągiem.
- Zaprojektowanie i zbudowanie obudowy śmigła, dla której będzie możliwa zmiana konfiguracji z dyszy przyspieszającej na opóźniającą. Doktorant przyjął założenie, że zmiana geometrii wlotu i wylotu powinna obejmować relatywnie duży zakres, aby zmiana prędkości strumienia na wlocie i wylocie w porównaniu z prędkością napływającą na tarczę śmigła była zauważalna po uwzględnieniu niedokładności pomiarów.
- Zbadanie wpływu zmiany geometrii obudowy na charakterystyki aerodynamiczne zespołu napędowego - w szczególności zbadanie czy zmiana konfiguracji na dyszę opóźniającą umożliwi uzyskanie ciągu dla prędkości (posuwów) większych niż dla śmigła otwartego o tym samym skoku.
- Przeprowadzenie badań numerycznych pozwalających na dobór sposobu przeprowadzenia symulacji oraz dobór sposobu modelowania w taki sposób, aby wyniki symulacji były najbardziej zbliżone do eksperymentu.
- Wykorzystanie zwalidowanego eksperymentalnie modelu obliczeniowego do obliczeń aerodynamicznych nowo projektowanych zespołów napędowych ze śmigłem obudowanym.

Można zatem stwierdzić, że Doktorant podjął się opracowania schematu działań prowadzących do opracowania metodyki obliczeń aerodynamicznych zespołów napędowych statków powietrznych ze śmigłem obudowanym, z ciągiem sterowanym za pomocą pierścienia o zmiennej geometrii. Uważam, że mgr inż. Tomasz Muszyński taką metodykę opracował.

**Część doświadczalną i teoretyczną – obliczeniową** obejmującą rozdziały 2 i 3 (59 stron), w której Doktorant opisał obiekt badań – obudowane śmigło 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 oraz symulacje wykonane metodami Cyfrowej Mechaniki Płynów, w tym przedstawił:

- konstrukcję i wyposażenie pomiarowe stanowiska badawczego;
- opis modelu użytego do badań;

- wyniki pomiarów 32 różnych konfiguracji geometrii obudowy śmigła;
- analizę otrzymanych wyników, w tym porównanie charakterystyk śmigła obudowanego z charakterystykami śmigła otwartego;
- przygotowanie modelu geometrycznego i sposób generowania siatek obliczeniowych modelu;
- wyniki symulacji numerycznych;
- analizę wyników badań numerycznych.

Całość pracy kończy **podsumowanie**, w którym Autor 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 i w locie. 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 Autora 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 obudowanych zespołów napędowych statków powietrznych.

### **3. Metoda wykładu**

Rozprawa doktorska mgr inż. Tomasza Muszyńskiego ilustrowana jest 68 rysunkami oraz ilustracjami, (w tym 37 wykonanymi przez autora), zawiera 22 tabele wykonane przez Autora i 37 wykresów, (w tym 24 opracowanych przez Doktoranta). 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. Tomasza Muszyńskiego. Doktorant nie ustrzegł się drobnych pomyłek tzw. „literówek”. Praca jest napisana zasadniczo poprawnym językiem, jednakowoż Autor ma dość trudny styl pisania. Dlatego też czytanie pracy wymaga dużego skupienia. Przyczyną jest m. innymi stoso-



wanie charakterystycznych dla niemieckojęzycznych tekstów naukowych długich zdań. Przykładem może być zdanie ze strony 59: „..... Przeprowadzone badania pozwoliły zaobserwować trend polegający na tym, że dla badanego zespołu napędowego, dla poszczególnych geometrii, zależność pomiędzy zdolnością do wytwarzania ciągu statycznego i ciągu dla dużych posuwów (powyżej 0,7) jest odwrotnie proporcjonalna: im wyższy przyrost ciągu statycznego tym większy opór i mniejszy ciąg całkowity zespołu napędowego dla większych prędkości o geometriach dających największy ciąg.....”.

### **B. Zalety**

- Obszerny zakres problemowy pracy dający pogląd na ważność podjętej tematyki, oraz dogłębne studium przedmiotu pracy zawarte w rozdziale 1.
- Zaprojektowane i zbudowane przez mgr inż. Tomasza Muszyńskiego unikalne stanowisko badawcze śmigła obudowanego. Stanowisko to zostało wyposażone w zaprojektowaną przez Doktoranta aparaturę sterującą i pomiarową. Na szczególną uwagę zasługuje innowacyjna obudowa zaprojektowana i wykonana przez Kandydata. Obudowa składa się z 64 ruchomych elementów pokrycia. Konstrukcja ruchomych elementów pokrycia została oparta o rozwiązania biomimetyczne. Ruchome elementy obudowy mają postać zachodzących na siebie, wzajemnie się usztywniających i uszczelniających ruchomych elementów o konstrukcji zainspirowanej przez pióra ptasich ogonów.
- Opracowanie algorytmów i rozwiązań sterowania biomimetycznymi elementami obudowy śmigła.
- Opracowanie programu w środowisku DasyLab v.11 umożliwiającego przeprowadzenie w sposób automatyczny serii pomiarów. Program umożliwiał łatwą zmianę ustawień parametrów eksperymentu.
- Wykonanie serii pomiarów dla 32 wariantów ustawień dysz wylotowej i wlotowej.
- Porównanie wyników pomiarów z pomiarami wykonanymi dla tego śmigła bez osłony.
- Przygotowanie modelu geometrycznego obudowanego śmigła oraz opracowanie dobrane sposobu generowania siatek obliczeniowych tego modelu.
- Przedstawienie i analiza wyników symulacji numerycznych.
- Stosowanie nowoczesnych narzędzi badawczych (programowania w środowisku pakietów DasyLab, ANSYS/Fluent).
- Uzyskanie ciekawych wyników przeprowadzonych badań i obliczeń numerycznych dokumentujących efektywność zaproponowanego rozwiązania obliczeń i symulacji komputerowych.

Należy przy tym podkreślić, że przeprowadzone przez mgr inż., Tomasza Muszyńskiego badania, obliczenia i analizy stanowią zarazem genezę pracy, a także uwypuklają nowe elementy opracowanego przez Doktoranta rozwiązania - biomimetycznie ukształtowanych dysz sterujących ciągiem śmigła obudowanego.

## **OCENA STRONY MERYTORYCZNEJ**

Zasadniczym przedmiarem pracy było wykonanie serii badań eksperymentalnych i obliczeń numerycznych opracowanego przez Doktoranta innowacyjnego, biomimetycznego układu umożliwiającego sterowanie ciągiem śmigła obudowanego. Na podstawie analizy dostępnych publikacji uważam, że zaproponowane przez mgr inż. Tomasza Muszyńskiego 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 dyszowego o zmiennej geometrii opartego o rozwiązanie biomimetyczne stanowi mim zdaniem innowacyjne rozwiązanie konstrukcyjne. Istotną częścią pracy jest stanowisko doświadczalne i przeprowadzone na mim badania eksperymentalne. Kandydat przedstawił wyniki uzyskane dla 32 różnych konfiguracji geometrii obudowy śmigła. Następnie wyniki badań dla śmigła obudowanego porównał z charakterystykami śmigła otwartego o tej samej geometrii co wirnik obudowany. Mgr inż. Tomasz Muszyński przedstawił dogłębną analizę wyników eksperymentu, połączona z analizą błędu. W części numerycznej Doktorant przedstawił przygotowanie modelu geometrycznego, dobór typu i sposoby generowania siatek obliczeniowych oraz dobór modeli turbulencji. Obliczenia numeryczne przeprowadził dla dwóch przypadków geometrii pierścienia. Wyniki obliczeń porównał z danymi doświadczalnymi.

Uważam, że w rezultacie podjętych badań doświadczalnych i symulacji komputerowych Doktorant udowodnił tezy rozprawy. Pierwszą z nich była twierdzenie, że możliwe jest zbudowanie obudowy śmigła o zmiennej geometrii, która dla małych posuwów będzie posiadała cechy śmigła obudowanego z dyszą przyśpieszającą, natomiast po zmianie konfiguracji będzie posiadała cechy śmigła obudowanego z dyszą opóźniającą. Drugą potwierdzoną tezą było stwierdzenie, iż -zastosowanie zmiennej geometrii obudowy śmigła pozwala na uzyskanie większego ciągu dla warunków statycznych i małych posuwów oraz poprawę sprawności dla większych posuwów, w a szczególności uzyskanie ciągu dla posuwów większych niż maksymalne dla śmigła otwartego, (dla założonego stałego skoku śmigła).



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

- uważam, że lepsze wyniki symulacji CFD można było uzyskać stosując metodę VBM z kształtem i profilem łopaty.
- uważam, że pracę wzbogaciłyby analizy emisji hałasu w porównaniu ze śmigłem otwartym.

## 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.

Za najistotniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

- opracowanie innowacyjnego biomimicznego rozwiązania układu sterowania ciągiem śmigła obudowanego ;
- opracowanie i wykonanie unikalnego stanowiska badawczego;
- przeprowadzenie szeregu badań eksperymentalnych i symulacyjnych wykazujących efektywność zaproponowanego układu zmiany geometrii dysz wlotowej i wylotowej;
- 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 śmigieł obudowanych o zmiennej geometrii obudowy.

Bez wątplenia praca doktorska została wykonana samodzielnie i wnosi wkład w rozwój badań nad aerodynamiką śmigieł obudowanych. 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 zespołów napędowych z obudowanymi śmigłami i sterowaniem ciągu za pomocą pierścienia o zmiennej geometrii. Należy podkreślić, że wyniki badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej mgr inż. Tomasza Muszyńskiego znalazły zastosowanie w projekcie bezzałogowego statku powietrznego, który został opracowany na potrzeby Wodnego Ochotniczego Pogotowia Ratunkowego. W projekcie porównano wyniki obliczeń siły ciągu śmigła obudowanego o średnicy 0,28 m dla różnych konfiguracji obudowy i wybrano profil z najlepszymi osiąganymi. Dobre własności tego profilu zostały potwierdzone pod-

czas prób w locie. BSL w który zastosowano zaprojektowane przez Doktoranta śmigło obudowanego miało znacznie krótszą długość startu oraz ponad dwukrotnie większą długotrwałość lotu, w porównaniu z ogólnie dostępnymi rozwiązaniami zastosowanymi w pierwszym prototypie.

Wobec spełnienia wszystkich wymogów obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym, stawiam wniosek o przyjęcie pracy i dopuszczenie mgr inż. Tomasza Muszyńskiego do jej publicznej obrony. Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

