

Piotr DOERFFER, prof. dr hab. inż.,
OŚRODEK PRZEPLYWÓW I SPALANIA
ul. Fiszera 14
80-231 Gdańsk
tel.: (+48) 58 5225 202
fax: (+48) 58 341-61-44
e-mail: doerffer@imp.gda.pl

12.09.2022

Recenzja pracy doktorskiej:

Wpływ parametrów konstrukcyjnych bezzałogowego aparatu latającego w układzie żyrodyny na jego wydatek energetyczny niezbędny do monitoringu infrastruktury liniowo-punktowej

Autor: mgr inż. Jan Muchowski

Recenzje wykonano na zlecenie Politechniki Rzeszowskiej, Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa.

1) Charakter pracy

Praca dotyczy bardzo aktualnej tematyki w lotnictwie związanej z Bezzałogowymi Aparatami Latającymi. Jest ona poświęcona wybranemu typowi misji infrastruktury liniowo-punktowej, z której wynika typ aparatu latającego, odpowiedniego do podjętych zadań.

O dojrzałości podejścia do opracowywanego zagadnienia świadczy połączenie prac eksperymentalnych z numerycznymi, które wspólnie pozwalają na pogłębienie analiz i wniosków i podnoszą poziom zaufania do rezultatów pracy.

Zawartość rozprawy

Opisy zawarte we wstępie i analizie stanu wiedzy pozwalają na bardzo dobre zorientowanie się w tematyce podjętej przez kandydata. Pokazują również na istotne aspekty, które leżą u podstaw podjętych badań.

W kolejnym Rozdziale-3 kandydat przedstawia pokrótce problem badawczy i metodykę badawczą.

Rozdział-4 omawia badania modelu żyrodyny. Przedstawiono metody opisu zachowania żyrodyny, przedstawiono szczegółowy plan badań, dokładnie opisano zastosowany model, przedstawiono tunel aerodynamiczny z aparaturą pomiarową oraz omówiono niepewności pomiarowe wraz z zastosowanymi poprawkami tunelowymi.

W głównej części rozprawy w Rozdziale-5 zawarto wyniki badań eksperymentalnych. Obejmowały one szczegóły aerodynamiczne:

- opływu kadłuba
- układu samolotu – kadłub ze skrzydłami
- układu wiatrakowca
- układu śmigłowca
- układu żyrodyny – w zawisie i w locie poziomym.

Drugim, ważnym elementem głównej części rozprawy są symulacje numeryczne CFD. Zastosowano komercyjny kod FLUENT z dodatkowym modułem VBM, który pozwala na uwzględnienie w obliczeniach elementów napędowych jak śmigła czy wirniki. Tu uwagę poświęcono siatkom obliczeniowym, warunkom brzegowym oraz ustawieniom solwera do symulacji różnych badanych konfiguracji. W dalszej części rozdziału przedstawiono wyniki uzyskane z analiz CFD oraz porównano je z wynikami badań eksperymentalnych.

Konkluzją pracy jest ostatni Rozdział-7 obejmujący porównanie wydatku energetycznego układu śmigłowca i żyrodyny do realizacji tej samej misji. Do tej analizy włączono też przypadek żyrodyny w locie poziomym, dla którego nie przeprowadzono badań eksperymentalnych. Jednakże doświadczenie wynikające z porównań wyników CFD z eksperymentem uzasadnia zaufanie do wyników CFD w ostatnim elemencie rozprawy.

2) Ocena pracy i uwagi dyskusyjne

Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne na tunelu w I-Lot stanowią istotny element przedstawionej dysertacji. Szeroki zakres badań zasługuje na szczególne uznanie.

Niestety przez brak możliwości odczytu siły oporu zrezygnowano z instalacji napędów marszowych. W tunelu aerodynamicznym badanie lotu poziomego jest możliwe bez dodatkowych napędów ale nie jest to pełne modelowanie lotu modelu. Trzeba jednak przyznać, że doktorant zdaje sobie z tego w pełni sprawę i uzupełnia ten brak symulacjami numerycznymi.

Badania charakterystyk zawisu żyrodyny wykonano dla 8 pozycji skrzydła. Każdej pozycji skrzydła odpowiadały dwa kąty zaklinowania (0° , 90°). Daje to w sumie wielką ilość 16-tu przebadanych konfiguracji.

Z przeprowadzonych badań doktorant wyciąga następujące wnioski:

Istotny jest kąt zaklinowania skrzydła na charakterystyki zawisu układu żyrodyny ponieważ poziome skrzydło blokuje przepływ w pionie.

Wpływ przesunięcia skrzydła w poziomie względem osi wału wirnika na charakterystyki zawisu układu żyrodyny pokazuje, że najmniej korzystnym przypadkiem umieszczenia skrzydła względem osi wirnika jest umieszczenie go w osi wirnika.

Wpływ przesunięcia skrzydła w pionie względem płaszczyzny wirnika dla stałej odległości poziomej względem jego osi na charakterystyki zawisu układu żyrodyny pokazuje, że najlepsze charakterystyki zawisu ma żyrodyna ze skrzydłem w pozycji PS32, czyli najbardziej oddalonym od płaszczyzny wirnika.

Istotnym elementem badań i analizy jest porównanie wiatrakowca z żyrodyną w locie poziomym.

Z analizy wpływu przesunięcia skrzydła w pionie względem tarczy wirnika na charakterystyki lotu poziomego układu żyrodyny wynika, że współczynnik siły nośnej C_z dla całego zakresu posuwów wirnika jest o około 20% większy dla modelu w układzie żyrodyny (PS12_ δ S 0° , PS22_ δ S 0°) niż dla układu wiatrakowca.

Z analizy wpływu przesunięcia skrzydła w poziomie względem osi wirnika na charakterystyki lotu poziomego układu żyrodyny wynika, że przesunięcie w poziomie skrzydła względem osi wirnika może zwiększyć maksymalną doskonałość o około 6%.

Z analizy wpływu zmiany kąta zaklinowania skrzydła (0 i 4°) na charakterystyki lotu poziomego układu żyrodyny wynika, że położenie skrzydła oraz jego kąt zaklinowania względem wirnika mają istotny wpływ na charakterystyki układu żyrodyny.

Wszystkie powyższe zabiegi mają bardziej pozytywny wpływ na konfigurację żyrodyny niż wiatrakowca. Ponieważ sprawa dotyczy lotu poziomego to wydaje się, że w ramach rozpatrywanej koncepcji lot poziomy powinien być zdominowany zastosowaniem wiatrakowca. Żyrodyna powinna być raczej zastosowana w zawisie.

Badania CFD i porównanie z eksperymentem

Badania eksperymentalne w tunelu aerodynamicznym zostały uzupełnione symulacjami numerycznymi. Doktorant nie ma wkładu w rozwój zastosowanych metod ale wykazał się efektywnym wykorzystaniem CFD do badanych przepływów, które niewątpliwie należą do realizacji bardzo ambitnych celów. Skrótowo opisane podejście numeryczne generuje wiele pytań. Można powiedzieć, że wykazywana zgodność wyników CFD z wynikami eksperymentalnymi potwierdza poprawność wyników CFD, ale w pracy naukowej to nie wystarczy. Ostatni akapit na stronie 132 jest przykładem niedostatecznego wyjaśnienia ważnych kwestii. Akapit ten dotyczy zarówno opływu modelu BAL jak i modelu VBM wirnika. W tym kontekście podano, że $y^+ = 40$ do 150. Tak wielkie wartości świadczą o braku możliwości prawidłowego modelowania warstwy przyściennej i oderwania, które mają zasadniczy wpływ na aerodynamikę BAL. Powstaje więc pytanie jak wyjaśnić tą zgodność CFD z eksperymentem.

Wykresy przedstawiające porównanie CFD i eksperymentu dla wirnika w stanie autorotacji Rys.6.15 do Rys.6.20 w układzie wiatrakowca przedstawiają widoczne różnice wartości oraz charakteru krzywych. Jednakże przez punkty na tych wykresach przeprowadzono aproksymację liniową. Czy jest jakieś uzasadnienie takiego podejścia?

Porównanie CFD z eksperymentem dla śmigłowca w zawisie wskazuje na nieduże różnice. Celem badania charakterystyk śmigłowca w locie poziomym było jego późniejsze porównanie z charakterystykami żyrodyny. Dla uproszczenia obliczeń zrezygnowano z trzymowania poprzecznego wirnika i zmiany skoku cyklicznego.

Badania charakterystyk żyrodyny w zawisie przeprowadzono analogicznie do badań śmigłowca. Model żyrodyny do badań charakterystyk zawisu nie uwzględniał napędów/śmigieł marszowych. Wykresy Rys.6.26 do Rys.6.29 pokazują dobrą zgodność wyników CFD z eksperymentem. Wyniki obliczeń zawisu żyrodyny PS22_δS0 ° są zbieżne z eksperymentalnymi dla zakresu kątów skoku ogólnego do 10°. Załamują się powyżej 12° podobnie jak miało to miejsce przy charakterystykach zawisu śmigłowca.

Wyznaczenie charakterystyk aerodynamicznych żyrodyny w locie poziomym wykonano dla dwóch konfiguracji modelu PS22_δS0 ° :

- a) żyrodyna bez napędów marszowych: PS22_δS0 ° ,
- b) żyrodyna z napędami marszowymi umieszczonymi na końcówkach skrzydeł:
PS22_δS0 ° +nap_marsz.

Model geometryczny bez napędów marszowych odpowiadał modelowi badanemu w tunelu aerodynamicznym. W żyrodynie z napędami marszowymi zamodelowano śmigła APC 5x3 umieszczone na końcówkach skrzydeł. Model śmigła wykonano analogicznie do modelu wirnika nośnego przy użyciu modułu VBM.

Wykresy przedstawiające porównanie CFD i eksperymentu dla układu żyrodyny na Rys.6.36 do Rys.6.40 przedstawiają widoczne różnice wartości oraz charakteru krzywych. Jednakże przez punkty na tych wykresach przeprowadzono aproksymację liniową. Czy jest jakieś uzasadnienie takiego podejścia? Podobne podejście miało miejsce na Rys.6.15 do Rys.6.20 w układzie wiatrakowca.

Porównanie układów

Do porównania wydatków energetycznych uwzględniono dwie konfiguracje żyrodyny: z mechanizmem zmiany kąta zaklinowania skrzydła oraz ze skrzydłem stałym. Mechanizm pozwala na zmianę kąta zaklinowania skrzydła dla fazy zawisu $S = 90^\circ$ do $S = 0^\circ$ dla fazy lotu poziomego.

Moc niezbędna układu żyrodyny PS22_δS90°-0° oraz PS22_δS0° dla fazy zawisu jest kolejno o 20% i 33% większa niż dla układu śmigłowca.

Dla małych prędkości przelotowych ($V < 11$ [m / s]) układ śmigłowca wymaga mniej mocy niezbędnej do lotu niż układ żyrodyny. Powyżej $V = 11$ [m / s] zapotrzebowanie na moc do lotu poziomego dla układu żyrodyny jest mniejsze niż dla układu śmigłowca i osiąga swoje minimum (około 50W) dla prędkości około 19 – 20 [m / s].

Z powyższych zależności wynika (Rys. 7.2), że wydatek energetyczny niezbędny do realizacji misji oblotu infrastruktury liniowo-punktowej zależy będzie od stosunku czasu zawisu do czasu lotu poziomego oraz założonej prędkości przelotowej.

Z przedstawionych wyników obliczeń, zaprezentowanych na wykresach (Rys. 7.3, Rys. 7.4, Rys. 7.5), wynika, że dla misji oblotu infrastruktury liniowo-punktowej w sytuacji, gdy dominuje faza zawisu (*czas zawisu / czas lotu poziomego* = 0, 8 , oraz więcej), śmigłowiec ma zdecydowanie mniejsze zapotrzebowanie energetyczne niezbędne do wykonania takiej misji od żyrodyny bez mechanizmu zmiany kąta zaklinowania skrzydeł. Dla całego zakresu analizowanych prędkości lotu poziomego układ śmigłowca wymaga średnio $V = 12 \div 18$ [m/s] o 20% mniej energii od takiej konfiguracji żyrodyny.

Natomiast porównując zapotrzebowanie energetyczne śmigłowca z żyrodyną posiadającą mechanizm zmiany kąta, można zauważyć, że żyrodyna taka ma nieznacznie większe zapotrzebowanie na moc w zakresie prędkości $V 12 \div 18$ m/s , a dla założonej prędkości $V = 18$ m/s zapotrzebowania energetyczne wyrównują się.

Dla stosunku (*czas zawisu / czas lotu poziomego* = 0. 5) układ żyrodyny z możliwością zmiany kąta zaklinowania skrzydła dla całego analizowanego zakresu prędkości ma mniejsze zapotrzebowanie energetyczne niezbędne do realizacji misji od śmigłowca. Różnica w zapotrzebowaniu pomiędzy tymi układami rośnie wraz z prędkością przelotową. I tak dla prędkości $V = 15$ [m / s] żyrodyna PS_22δS90°-0° ma 9% mniejsze zapotrzebowanie energetyczne niezbędne do wykonania misji.

Żyrodyna bez mechanizmu zmiany kąta zaklinowania skrzydeł dla całego zakresu prędkości jest gorsza od układu śmigłowca. Dla stosunku (*czas zawisu / czas lotu poziomego* = 0. 2) , a więc przypadku, gdzie dominującą fazą lotu w misji oblotu infrastruktury liniowo-punktowej jest lot poziomy, zarówno żyrodyna z mechanizmem zmiany kąta zaklinowania, jak i żyrodyna bez tego mechanizmu mają mniejsze zapotrzebowanie energetyczne niezbędne do realizacji misji od śmigłowca dla całego analizowanego zakresu prędkości przelotowych.

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”. Teza ta jest prawdziwa dla układu żyrodyny z mechanizmem zmiany kąta zaklinowania 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 ten stosunek wynosi 0,2 i mniej, również żyrodyna bez takiego mechanizmu ma mniejsze zapotrzebowanie energetyczne do wykonania analizowanej misji.

3) Szczegółowe uwagi

C_x – siła oporu a na wykresie 6.2 str. 138 w podpisie jest siła nośna.

Wadliwa legenda na podanych rysunkach:

Rys.: 5.38; 5.40; 5.41; 5.44; 5.45-5.47; 6.38; 6.41- 6.48; 7.3-7.5

Ostatni akapit na stronie 143 jest niezrozumiały i brzmi w następujący sposób:

Przebieg charakterystyki C oraz uzyskanej w wyniku obliczeń odpowiada $C_x(\mu)$ $C_z(\mu)$ przebiegowi eksperymentalnemu dla całego zakresu posuwów. Obliczeniowa wartość C_x jest większą od obliczeniowej o około 15% dla całego zakresu posuwów, natomiast C_z obliczeniowy jest większy o około 6,5 procenta.

4) Podsumowanie oceny rozprawy

Istotnym elementem w ocenie rozprawy jest załączony opis budowy i badania żyrodyny w warunkach rzeczywistych. Powstanie takiego prototypu pokazuje, że badania przeprowadzone w rozprawie mają swoje bezpośrednie odniesienie do praktycznych zastosowań.

Przedstawiona rozprawa dotyczy bardzo aktualnego zagadnienia, które wymaga wielu prac badawczych dla zapewnienia wysokiej jakości uzyskanych wyników.

W ocenie dysertacji należy podkreślić, że prowadzone badania składały się zarówno z prac eksperymentalnych jak i analiz numerycznych. Doktorant wykorzystał w pracy obie metody badawcze, co stawia pracę na wysokim poziomie merytorycznym.

Opłacalność zastosowania różnych typów aparatów latających dla różnych typów podejmowanych misji utrudnia jednoznaczne określenie wyników przedstawionej pracy. Przedstawiona rozprawa daje podstawy merytoryczne do podejmowania odpowiednich decyzji.

5) Konkluzja recenzji

Powyżej przedstawione krytyczne uwagi wynikają z szerokiego zakresu przedstawionej rozprawy. Nie wpływają one jednak na wartość przedstawionej pracy doktorskiej. Przedstawiony materiał badawczy będzie niewątpliwie źródłem dalszych badań i analiz.

Jestem przekonany, że przedstawiona praca doktorska spełnia kryteria stawiane przez ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. Nr 65, poz 595 z późniejszymi zmianami) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.