

Dr hab. inż. Andrzej Majka, prof. PRz
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
Tel.: +48 17 865 16 04
Andrzej.majka@prz.edu.pl
<https://kilik.prz.edu.pl/>

Rzeszów, 2022-05-16

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej
mgr inż. Tytusa Tulwina
nt. „Redukcja zużycia energii wiroplata
poprzez modyfikację przepływu powietrza przez rotory”
promotor: prof. dr hab. inż. Mirosław Wendeker
promotor pomocniczy: dr inż. Konrad Pietrykowski

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję opracowano na prośbę Zastępcy Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej, będącą konsekwencją Uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna z dnia 23.02.2022 r. (pismo o sygnaturze RDN/IM/150/2021 z dnia 25.02.2022).

Ocena wyboru tematu

Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej mgr inż. Tytusa Tulwina odnosi się do istotnej i aktualnej tematyki związanej z redukcją zużycia energii wiroplata wielowirnikowego oraz możliwościami poprawy efektywności lotu aparatów w układzie wielowirnikowym, w szczególności w fazie zawisu.

W ostatnich latach ma miejsce gwałtowny wzrost rozwoju bezzałogowych systemów latających, zarówno cywilnych jak i wojskowych. Zostało wykazane, że wykorzystywanie aparatów bezzałogowych do wykonywania różnorodnych zadań, może przynieść realne korzyści dla społeczeństwa i gospodarki. Większość aparatów bezzałogowych, które będą rozwijane w przyszłości do zastosowań cywilnych, będzie wykonywało loty w niewielkich

obszarach, wysoko zurbanizowanych przestrzeni U-space. Loty będą wykonywane głównie przez aparaty w układzie wielowirnikowym, tzw. multikoptery, często realizujące misje rozpoznania i dozoru z powietrza. Misje tego typu będą wymagały dużej długotrwałości lotu, przy stosunkowo niskich wymaganiach odnośnie manewrowości i zakresu prędkości użytkowych, gdyż głównym elementem tych misji będzie pozostawanie obiektu latającego w zawisie.

Aparaty bezzałogowe realizujące tego typu misje będą różniły się od obecnie wykorzystywanych aparatów bezzałogowych, ze względu na inne wymagania i przeznaczenie. Jednym z możliwych kierunków rozwoju będzie opracowanie i budowanie aparatów w nieortodoksyjnych układach wielowirnikowych, współosiowych charakteryzujących się stosunkowo niewielkimi wymiarami poprzecznymi oraz lepszym stosunkiem zapotrzebowania na moc do ciężaru obiektu.

Projektowanie i budowa aparatów w tych układach, a w szczególności ich optymalizacja wymaga szerokiej wiedzy dotyczącej fizyki lotu tego typu obiektów oraz odpowiednich modeli obliczeniowych, prawidłowo odwzorowujących ich najważniejsze charakterystyki. W tym sensie rozprawa doktorska mgr inż. Tytusa Tulwina bardzo dobrze wpisuje się bieżące potrzeby dotyczące badań nad współosiowymi układami wielowirnikowymi, które w przyszłości będą mogły być stosowane w aparatach bezzałogowych charakteryzujących się obniżonym zapotrzebowaniem na moc do lotu w fazie zawisu oraz wynikającą z tego większą długotrwałością lotu. Aparaty tego typu będą się również charakteryzowały mniejszym, niekorzystnym oddziaływaniem środowiskowym, dzięki redukcji śladu węglowego wynikającego z mniejszego zapotrzebowania energetycznego układu.

Ocena merytoryczna

Do najważniejszych problemów dotyczących rozwoju współczesnych systemów bezzałogowych należy zaliczyć poprawę efektywności ich funkcjonowania oraz poprawę kluczowych osiągnięć. Można tego dokonywać poprzez ciągłe ulepszanie stosowanych rozwiązań technologicznych, ale również poprzez sięganie do rozwiązań niekonwencjonalnych, których specyficzne właściwości mogą być wykorzystywane w pewnych, szczególnych zastosowaniach. Przykładem takiego niekonwencjonalnego układu jest zespół współosiowych wirników pracujących w dalekim rozstawieniu. Dzięki takiej konfiguracji ułożenia wirników, można ograniczyć wymiary poprzeczne aparatu latającego oraz wyraźnie poprawić efektywność jego funkcjonowania. Obecnie brak jest w literaturze wyników badań tego typu układów, w szczególności odnoszących się do określenia wpływu rozstawiania i liczby wirników, na zapotrzebowanie na moc do lotu.

Dotychczas prowadzone prace dotyczące współosiowych układów wielowirnikowych koncentrowały się na układach dwuwirnikowych, pracujących w niewielkiej odległości pomiędzy nimi. Wynikało to z założonego sprzężenia mechanicznego pomiędzy wirnikami,

które w naturalny sposób ograniczało odległość pomiędzy pracującymi wirnikami.. Rozwój technologii napędów elektrycznych daje możliwość tworzenia układów bez tego typu ograniczeń konstrukcyjnych. Pojawia się więc pytanie, jak odległość pomiędzy pracującymi wirnikami, wpływa na ich efektywność i sprawność? Praca Pana mgr inż. Tytusa Tulwina jest próbą odpowiedzi na tak postawione pytanie.

Zasadnicza część pracy doktorskiej Pana Tytusa Tulwina koncentruje się na badaniach eksperymentalnych układów dwuwirnikowych w warunkach statycznych oraz badaniach symulacyjnych, wykorzystujących opracowane modele obliczeniowe. Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały na specjalnie opracowanym na ich potrzeby stanowisku laboratoryjnym, które składało się z dwóch układów wirnikowych, które pracując przy poziomym położeniu osi, mogły być badane dla szerokiego zakresu odległości pomiędzy nimi. Zastosowane wyposażenie pomiarowe, pozwalało na precyzyjny pomiar ciągu, momentu reakcyjnego silnika, prędkości obrotowej, natężenia przepływu prądu oraz wartości napięcia zasilania silników napędzających wirniki. Badania eksperymentalne przeprowadzone zostały w trzech etapach. Dwa pierwsze etapy dotyczyły badań pojedynczych, izolowanych wirników, zaś etap trzeci polegał na pomiarze parametrów pracy obu zespołów wirnikowych, ustawionych współosiowo, dla różnych odległości pomiędzy ich tarczami.

Wyniki badań eksperymentalnych pozwoliły na określenie zestawu parametrów niezbędnych do budowy modelu matematycznego. Posłużyły również do przeprowadzenia procesu walidacji modelu, który wykazał poprawność jego funkcjonowania. Opracowany model matematyczny posłużył do przeprowadzenia szeregu badań numerycznych, w ramach których metodami symulacyjnymi przeanalizowano wpływ większej liczby wirników, dla różnych odległości pomiędzy ich tarczami, na efektywność energetyczną układu. Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych jednoznacznie wskazały na występowanie korzyści energetycznych, wynikających z zastosowania układów wielu wirników pracujących współosiowo, w dalekim rozstawie.

Przyjęta koncepcja metodologiczna pracy jest właściwa. Na podstawie studium literatury oraz wstępnych analiz teoretycznych opartych o teorię strumieniową, Autor sformułował tezę badawczą oraz cel rozprawy. Dla realizacji celu, a następnie weryfikacji sformułowanej tezy, Autor zaplanował serię badań eksperymentalnych oraz symulacyjnych. Zaplanowane badania eksperymentalne i symulacje były niezbędne do osiągnięcia celu badawczego i potwierdzenia prawdziwości sformułowanej tezy. Realizacja badań eksperymentalnych wymagała opracowania narzędzi badawczych, planu badań oraz metody opracowania i weryfikacji wyników.

Wszystkie prace zaplanowane do realizacji w ramach pracy doktorskiej miały charakter badawczy, ukierunkowany na poszerzenie wiedzy na temat właściwości i cech wielowirnikowych układów współosiowych pracujących w dalekim rozstawieniu. Uzyskane rezultaty wskazują na duży potencjał w zakresie redukcji zapotrzebowania na moc do lotu

w zawisie układów wielowirnikowych oraz na duże możliwości poprawy osiągnięć, w szczególności długotrwałości lotu, aparatów budowanych w takim układzie.

Przedstawione przez Autora wyniki i wnioski stanowią ważny krok w kierunku określenia dalszych obszarów badań, efektem których może być opracowanie aparatów bezzałogowych, charakteryzujących niższym zapotrzebowaniem mocy oraz większą długotrwałością lotu w warunkach zawisu.

Uwagi szczegółowe

Praca zawarta została na 125 stronach. Składa się z 3 rozdziałów merytorycznych, wstępu, podsumowania wyników badań, wniosków, bibliografii, spisów tabel i rysunków, wykazu skrótów i symboli oraz streszczenia.

We wstępie autor krótko przedstawił tematykę rozprawy, zdefiniował oraz wyjaśnił kluczowe pojęcia i zagadnienia, omówił teorię strumieniową wykorzystywaną w analizach, scharakteryzował stan pracy wirników współosiowych określając najważniejsze współczynniki opisujące zapotrzebowanie energetyczne układu. Analizując aktualny stan wiedzy, Autor wskazał na fakt, że dotychczas badane były tylko układy wirników współosiowych o niewielkiej separacji. Autor przeanalizował wyniki tych badań zarówno dla zawisu jak i dla lotu poziomego. W rozdziale drugim autor przedstawił zastosowaną metodologię badawczą. Sformułował w nim tezę oraz cel rozprawy. Celem rozprawy było opracowanie modelu matematycznego układu wirników współosiowych, dla szerokiego zakresu odległości pomiędzy nimi. Realizacja celu rozprawy oraz weryfikacja tezy naukowej została dokonana na podstawie wyników badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych. Na potrzeby realizacji badań doświadczalnych Autor opracował plan badań, który również został przedstawiony w rozdziale nr 2. Następnie Autor scharakteryzował wykorzystywane narzędzia badawcze, w skład których wchodziło między innymi stanowisko eksperymentalne, system pomiarowy oraz osprzęt dodatkowy. Wśród wykorzystywanych modeli empirycznych, Autor szczegółowo opisał zespół napędowy wirnika. W końcowej części rozdziału Autor opisał plan badań wirników izolowanych oraz wirników nośnych w ustawieniu współosiowym. Rozdział kończy się sformułowaniem założeń dla opracowywanego modelu matematycznego układu wirników współosiowych, z których najważniejsze to uwzględnienie większej liczby wirników współosiowych znajdujących się w dużej odległości od siebie.

Rozdział trzeci prezentuje wyniki stanowiskowych badań doświadczalnych. Na początku badaniom poddane zostały 2 wirniki izolowane, o tych samych parametrach, dla różnych wartości parametru FM (Figure of Merit). Otrzymane różnice wynikają ze zmiennych warunków środowiskowych oraz indywidualnych cech szczególnych każdego układu. W drugim etapie, badaniom poddano układy dwuwirnikowe, ze zidentyfikowanymi charakterystykami izolowanymi, w etapie pierwszym. W celu porównania wyników układu dwuwirnikowego z wynikami wirników izolowanych, badania wykonywano dla tej samej siły

ciągu, która w przypadku układu dwuwirnikowego była wytwarzana przez każdy z wirników w równej proporcji (po 50%). Pomiaru były zbierane w kolejności losowej w celu uśrednienia błędów pomiarowych zależnych od czasu zbierania pomiaru. Wyniki pomiarów pozwoliły wyznaczyć charakterystyki śmigłowe dla kolejnych wartości siły ciągu układu oraz dla zmiennej separacji osiowej wirników nośnych. Dla wszystkich badanych przypadków, dla zadanej wartości siły ciągu, wraz ze zwiększaniem separacji osiowej zmniejsza się sumaryczna moc mechaniczna wirników. Zaobserwowano również, że dla rosnącej, zadanej wartości siły ciągu, spadek mocy sumarycznej wraz ze zwiększaniem odległości, jest coraz większy. Zależności odkryte w trakcie badań, wykorzystano do budowy modelu matematycznego współosiowych wirników o dalekiej separacji.

W rozdziale czwartym Autor przedstawił wyniki badań symulacyjnych. We wprowadzaniu opisany został model matematyczny współosiowych wirników o dalekim rozstawieniu bazujący na teorii strumieniowej zmodyfikowanej przez Autora. Model zakłada, że prędkość przepływu na kierunku prostopadłym do płaszczyzny wirnika jest sumą prędkości przed wirnikowej oraz prędkości indukowanej przez analizowany wirnik. Takie ujęcie problemu pozwala na uwzględnienie w analizie układów wielowirnikowych, bez ograniczenia na liczbę analizowanych wirników. Autor określił wymiar modelu matematycznego oraz zdefiniował wszystkie jego parametry. Model został zweryfikowany przy wykorzystaniu wyników badań eksperymentalnych. Zanotowano niewielkie rozbieżności wyników eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem opracowanego modelu. Następnie przeprowadzono badania symulacyjne dwóch wirników współosiowych dla różnych odległości pomiędzy tarczami wirników oraz badania symulacyjne dla układów składających z większej liczby wirników (od 2 do 10 wirników). Wyniki przedstawiono w zależności czasu lotu w zawisie od liczby wirników. Otrzymane rezultaty wskazują na znaczący wpływ liczby wirników i odległości pomiędzy nimi na zużycie energii, przy tym samym ciągu sumarycznym.

Rozdział piąty stanowi podsumowanie badań. We wstępie autor przedstawił bilans energetyczny pojedynczego wirnika nośnego, wskazując na maksymalną wartość poprawy zużycia energii. Ze względu na niewielkie, możliwe korzyści autor zdecydował się na rozwijanie koncepcji układu wielowirnikowego, współosiowego o dalekim rozstawieniu. Zastosowanie napędów elektrycznych, pozwalających na zdecydowanie większe rozsuniecie wirników, niesie zdecydowanie większy potencjał poprawy zużycia energii. Badania eksperymentalne wykonano dla układu dwuwirnikowego, w szerokim zakresie rozstawu wirników. Wyniki badań eksperymentalnych układów dwuwirnikowych pozwoliły na opracowanie i walidację modelu matematycznego opisującego charakterystyki układów o większej liczbie wirników. Wyniki badań symulacyjnych pozwalają przewidywać redukcję zużycia energii w zawisie nawet do 54% oraz wydłużenie czasu lotu w zawisie do 85%. Autor pracy skupił się tylko na zysku energetycznym wynikającym z poprawy efektywności układów wielu wirników współosiowych, nie analizując problemów związanych z potrzebą zapewnienia energii

elektrycznej niezbędnej do ich pracy. Rozwiązaniem może być zastosowanie hybrydowych układów zasilających, co zostało wskazane przez Autora. Autor pokazuje, że układy wielowirnikowe, o wirnikach współosiowych pracujących w dużej odległości od siebie mogą być szczególnie korzystne w przypadku aparatów wykonujących długotrwały lot w zawisie.

W rozdziale szóstym zaprezentowane zostały kluczowe wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Autorowi pracy doktorskiej udało się uzyskać zależność opisującą wpływ oddziaływania pomiędzy wirnikami współosiowymi w funkcji ich rozstawienia. Zależność została wykorzystana do budowy modelu obliczeniowego układu wielowirnikowego składającego się wielu wirników współosiowych pracujących w dużej odległości od siebie. Model pozytywnie przeszedł proces walidacji, w trakcie badań eksperymentalnych układu dwuwirnikowego. Badania symulacyjne dla układów o większej liczbie wirników wskazały na dużą, możliwą reedukację zużycia energii wiroplata, dochodzącą nawet do 55%. Uzyskane wyniki w pełni potwierdziły postawioną przez Autora tezę badawczą.

Bibliografia zawiera zestawienie 87 pozycji literaturowych wykorzystanych przez Autora w trakcie realizacji pracy doktorskiej. Zestaw pozycji źródłowych został właściwie dobrany pod względem zawartości merytorycznej oraz aktualności. Część cytowanych prac została napisana stosunkowo dawno temu, lecz należą one grupy tzw. pozycji fundamentalnych, stanowiących kamienie milowe w rozwoju wiedzy dotyczącej wiroplatów.

Ocena strony edytorskiej

Praca napisana jest językiem poprawnym i precyzyjnym. Strona edytorska pracy spełnia niezbędne, 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 zazwyczaj poprawnie używane. Materiały ilustracyjne oraz tabele i wykresy zostały zamieszczone w pracy w sposób właściwy i logiczny, uzupełniając opisywane treści.

Uwagi krytyczne

Mimo wysokiej oceny merytorycznej przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej, nasuwają się niewielkie wątpliwości i uwagi o charakterze krytycznym.

W pracy nie została wyjaśniona w sposób wystarczająco jasny metoda wyznaczania obciążenia dysku wirnika DL dla układów wielowirnikowych. Wyniki zawarte na wykresach od 4.10 do 4.20 przedstawiają zależność obciążenia mocy od liczby wirników, dla stałych wartości obciążenia dysku wirnika. Można więc wyciągnąć wniosek, że rosnąca liczba wirników, nie zmienia obciążenia dysku wirnika. A przecież przy stałej średnicy wirnika, rosnąca liczba wirników powinna powodować zmniejszanie się wartości DL. Być może głównym efektem powodującym zmniejszanie się obciążenia mocy PL z rosnącą liczbą wirników jest malejąca wartość DL dla każdego wirnika. Prosi się autora o skomentowanie powyższego domniemania.

Skąd wynika tak duża różnica charakterystyk wirnika nr 1 (rozdział 3.1) i wirnika nr 2 (rozdział 3.2), skoro były badane w tych samych warunkach?

Skąd może wynikać dosyć gwałtowna zmiana charakteru przebiegu zależności PL w funkcji liczby wirników na wykresie 4.20 dla najmniejszego rozstawu wirników, w porównaniu do przypadków z wykresów 4.10 do 4.19?

Jak Autor pracy wyobraża sobie praktyczną realizację aparatu latającego w układzie wielowirnikowym, dla rozstawu wirników z/D większego od 20 lub nawet 30?

Czy w układzie wielowirnikowym o dalekim rozstawie wirników, wykonującym lot ze składową poziomą prędkości, można w ogóle mówić o interferencji pomiędzy wirnikami?

Na stronie 66 znajduje się stwierdzenie: „Ponieważ znosi on głównie siły rozciągające...”. W tego typu układach momenty skręcające, pochodzące od momentów obrotowych są również znaczące. Wydaje się błędem ich pomijanie.

Praca zawiera również niewielką liczbę pomyłek oraz błędów językowych.

We wzorze (1.2) występuje oczywisty błąd polegający na zastosowaniu operatora dodawania, zamiast mnożenia.

We wzorze (1.5), w liczniku powinna znaleźć się wielkość mocy idealnej. Współczynnik C_{pi} sugeruje, że jest to moc indukowana przez wirnik. Natomiast moc indukowana jest to iloczyn mocy idealnej i współczynnika k . W tym samym wzorze C_p jest współczynnikiem mocy rzeczywistej, a nie mocy profilu. Współczynnik mocy profilu reprezentowany jest przez C_{p0} .

Podobnie wzór (1.7) określa współczynnik mocy idealnej, a nie mocy indukowanej.

Co należy rozumieć przez określenie „słabnące wartości C_{d0} ” (str. 15)?

Na stronie 17, lepiej by było napisać: przy przeciwnie ustawionych prędkościach obrotowych wirników.

Str. 17 – co należy rozumieć przez sformułowanie: że w rzeczywistości współczynnik redukcji zużycia energii osiąga wartości mniejsze niż 1, lecz nie większe niż $1/\sqrt{2}$?

Na stronie 56 Autor odwołuje się do równania 2.13. Brak jest w pracy wzoru o takim numerze.

Na stronie 57 podany został wzór (3.3). Czy prędkości tam występujące były mierzone? W jaki sposób?

Na stronie 57 Autor powołuje się na wykres, bez podania jego numeru. Nie wiadomo o jaki chodzi.

Na stronie 66 znajduje się stwierdzenie „Każdy element jest optymalizowany pod kątem najmniejszej masy i dużej sprawności, zachowując odpowiednie wartości współczynnika bezpieczeństwa”. Co ono oznacza? Jak definiowany był współczynnik bezpieczeństwa?

Na stronie 80 znajduje się stwierdzenie: „Pomijając te przypadki bliskiego rozstawienia, w każdym innym przypadku obciążenia dysku wirnika DL dla badanego zakresu występuje zmniejszenie zwiększenie czasu lotu...”. Czy chodzi o zmniejszenie, czy zwiększenie czasu lotu?

Na stronie 111 znajduje się stwierdzenie „średnica łopaty”. Co ono oznacza?

Na stronie 113, w punkcie 3, pierwsze zdanie jest niejasne. Jaka powinna być poprawna forma tego zdania?

Uchybieniem w pracy jest nie podawanie jednostek, lub podawanie jednostek błędnych. Wykaz skrótów i symboli nie zawiera żadnych jednostek. Brak jest informacji, które wielkości posiadają wymiar, a które są bezwymiarowe. W tabeli 2.9 (str. 42) siła została podana w [g]. Gram jest jednostką masy, a nie siły. Na stronie 52 siła podawana jest w jednostkach masy (gram).

Konkluzje

Przedstawioną do recenzji pracę oceniam wysoko i uważam, że została wykonana na zadowalającym poziomie merytorycznym. Praca ma charakter doświadczalny, łącząc badania eksperymentalne z badaniami symulacyjnymi. Treści merytoryczne zawarte w pracy świadczą o dużej dojrzałości naukowej i wiedzy merytorycznej Doktoranta.

Zaprezentowane w rozprawie wyniki badań są oryginalnym dorobkiem naukowym Doktoranta, a rezultaty pracy mogą znaleźć zastosowanie w praktyce. Zawarte w rozprawie badania i analizy są przeprowadzone na wysokim poziomie merytorycznym, a ich wyniki rozszerzają wiedzę z zakresu pracy układów wielowirnikowych, współosiowych o dalekim rozstawieniu.

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

- trafne zdefiniowanie przedmiotu badań i celu rozprawy,
- wysoki poziom merytoryczny pracy i znajomość rozważanej tematyki,
- oryginalne i ciekawe wyniki badań doświadczalnych oraz analiz symulacyjnych,
- umiejętność korzystania z literatury naukowej,
- przejrzysta i logicznie ułożona struktura pracy oraz jej cel i zakres.

Biorąc pod uwagę istotność tematyki pracy doktorskiej odnoszącej się do zagadnienia poprawy efektywności pracy wielowirnikowych układów nośnych, osiągnięte wyniki badawcze a także ich duże znaczenie naukowe stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Tytusa Tulwina spełnia warunki merytoryczne i formalne stawiane pracom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Mejlsz Andrzej