

dr hab. inż. Rafał Kowalik, prof. LAW  
Wydział Lotnictwa Lotniczej Akademii Wojskowej  
e-mail: r.kowalik@law.mil.pl

Dęblin, dnia 22.05.2022 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Tytusa Tulwina

**pt. Redukcja zużycia energii wiroplata poprzez modyfikację przepływu  
powietrza przez rotory**

**promotor: prof. dr hab. Mirosław Wendeker**

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi pismo z dnia 23 lutego 2022r. skierowane do mnie przez Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Politechniki Lubelskiej prof. dr hab. inż. Jarosława Bieniasia.

zawierające prośbę o ocenę rozprawy. Pismo przygotowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny z dnia 23 lutego 2022r.

Podstawę prawną opracowania recenzji stanowią:

- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669),
- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami),
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. poz. 261).

Rafał Kowalik

## 2. Wstęp i opinia ogólna

Badania symulacyjne opisujące mechanikę lotu statku powietrznego typu wiropłat jest bardzo złożonym zagadnieniem matematycznym oraz obliczeniowym. Metody matematyczne wykorzystane do opisu zagadnienia muszą się zmierzyć z zamodelowaniem szeregu niestacjonarnych zjawisk z dziedziny mechaniki płynów i mechaniki ciała stałego oraz z wzajemnym oddziaływaniem tych dwóch ośrodków. W przypadku lotu wiroplata charakterystyczne jest występowanie dwóch skal czasu: jednej związanej z poruszającymi się bardzo szybko wirującymi powierzchniami nośnymi i drugiej dotyczącej relatywnie małych prędkości postępowych występujących na statku powietrznym. Zjawiska te powodują istotne problemy przy całkowaniu równań ruchu konstrukcji wiroplatu oraz w doborze odpowiedniego kroku czasowego. Równocześnie istnieje bardzo duże zapotrzebowanie na tego typu metody symulacyjne.

Odnosi się to przede wszystkim do ich wykorzystania w toku projektowania nowych konstrukcji lotniczych. Na etapie wstępnego projektowania metody obliczeniowe pozwalają wypracować możliwie optymalną koncepcję wiroplata. Dodatkowo część stanów lotu zwłaszcza lotu nieustalonego nie jest możliwa do zamodelowania w badaniach tunelowych, a nawet ze względu na bezpieczeństwo pilota w badaniach w locie. W takim przypadku metody obliczeniowe mogą stanowić jedyne dostępne narzędzie badawcze.

Metody rozwiązujące pełne sprzężone układy równań opisujących rozważane zjawisko lotu wiroplata wymagają użycia bardzo złożonych algorytmów obliczeniowych oraz potężnej mocy komputerów, na których są realizowane i w chwili obecnej raczej nie mogą być uważane za użyteczne narzędzie wspierające proces projektowania. Należy jednak podkreślić, że ze względu na bardzo szybki rozwój sprzętu komputerowego i technik obliczeniowych w najbliższej przyszłości tego typu metody będą coraz szerzej rozwijane i wdrażane.

Mając powyższe na uwadze, stwierdzam jednoznacznie, że tematyka przedmiotowych badań w zakresie redukcji zużycia energii wiroplata poprzez modyfikacje przepływu powietrza przez rotory, a szczególnie przeprowadzone przez mgr inż. Tytusa Tulwina badania eksperymentalne i symulacyjne są aktualne i ważne zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

Przedłożona mi do recenzji dysertacja doktorska przygotowana przez Pana magistra inżyniera Tytusa Tulwina jest opracowaniem, które należy ocenić zdecydowanie pozytywnie.

Refat Nowak

Jest to praca doktorska stanowiąca dowód biegłej orientacji Autora w projektowaniu konstrukcji wiroplatu i przeprowadzaniu badań symulacyjnych, analizie danych i konstruowaniu logicznych wniosków. Co więcej, podjęty temat jest aktualny i istotny dla sektora lotniczego. W związku z powyższym podjęcie się przez Doktoranta badania redukcji zużycia energii wiroplatu uważam za uzasadnione i przyczyniające się do rozwoju nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria mechaniczna.

### **3. Opis formalny i omówienie struktury rozprawy doktorskiej**

Przedstawiona do recenzji dysertacja doktorska jest złożona z sześciu zasadniczych rozdziałów, spisu tabel, ilustracji i cytowanych pozycji literaturowych oraz streszczenia w języku polskim o łącznej objętości 125 stron. Praca zawiera 88 rysunków oraz 18 tabel.

W bibliografii uwzględniono 87 pozycji literaturowych obejmujących zarówno wydawnictwa zwarte, jak i artykuły naukowe. Pewne niedociągnięcia dotyczą pewnych wskazanych pozycji literatury. W większości są to starsze prace naukowe. W pracy brak jest odniesienia, dyskusji, czy wskazania normy wykonywania badań laboratoryjnych. Wskazane wątpliwości recenzenta mają jedynie charakter dyskusyjny do przemyślenia przez Doktoranta w kolejnych opracowaniach.

Struktura pracy jest w zasadzie tradycyjna (teoria – metoda – badania - dyskusja i wnioski), odpowiednia dla tego typu opracowania. Rozprawa ma charakter teoretyczno-badawczy, choć proporcje między obiema częściami nie są zachowane. Część teoretyczna (łącznie rozdział pierwszy oraz część drugiego) stanowi zaledwie 15% całości, podczas gdy część badawcza (łącznie rozdział trzeci, czwarty, piąty i szósty) stanowi 70% całości dysertacji, natomiast 5% poświęcono kwestiom metodologicznym, pozostałe 10% to wstęp, podsumowanie i wykaz bibliografii.

Układ całości rozprawy jest logiczny i czytelny, a język jakim posługuje się Doktorant jest poprawny choć są drobne niedociągnięcia w stylu i formatowaniu, które omówię w dalszej części recenzji. Podobnie jak w przypadku rysunków również w przypadku tabel wypracowany został jeden spójny graficznie standard przedstawiania danych. Bardzo ułatwia to analizę treści opracowania.

Argumentacje zawarte w poszczególnych rozdziałach stanowią logicznie powiązaną całość. Podział treści na rozdziały zasadniczo ujmuje wszystkie istotne elementy tematu rozprawy.

Rozdział pierwszy, pomimo że jest przygotowany niemal perfekcyjnie, jest zdecydowanie ograniczony jedynie do podstawowej analizy obecnego stanu wiedzy i nie zawarto w nim opisu jakie zagadnienia fizyczne badano w ośrodkach badawczych i opisano w publikacjach naukowych co świadczy o pośpiechu w przygotowaniu dysertacji. Synteza zagadnienia redukcji energii na wiropłatach omówiona w publikacjach literaturowych została przez Doktoranta pobieżnie przeprowadzona, z kolei opis z własnych badań symulacyjnych i rzeczywistych został przygotowany niemal wzorcowo.

Rozdział 2 poświęcono na zdefiniowanie celu, tezy pracy doktorskiej. W nim również przedstawiono plan badań rzeczywistych w specjalnie do tego celu przygotowanym stanowisku pomiarowym. Plan badań doktorant podzielił na trzy odrębne etapy. W pierwszym oraz drugim to badania pojedynczych struktur wiropłatu, zbieranie danych i wyznaczenie charakterystyk z których wynikać będą różnice w pracy testowanych elementów. W trzecim etapie doktorant badał wiropłaty z nastawieniem na wyznaczenie pomiarów pracy wirnika w ustawieniu współosiowym o zmiennej separacji  $s$ . Zawarto w nim również szczegółowy opis stanowiska laboratoryjnego oraz przedstawiono dane o wykorzystywanych w testach profilach. W rozdziale 3 omówiono wyniki z badań stanowiskowych wybranych wirników przy różnych warunkach pracy. W kolejnym rozdziale zaprezentowano wyniki z badań symulacyjnych oszacowujący efektywność opracowanej metody redukcji energii powstającej na wiropłatach.

Rozdział 5 (*Podsumowanie wyników badań*) liczący 9 stron, zawiera autorskie podsumowanie materiału teoretycznego i danych uzyskanych wraz z własną autorską oceną otrzymanych wyników, zebranych obserwacji, a także elementy dyskusji naukowej, czyli powiązania własnych wyników z wynikami badań prowadzonych przez innych badaczy. Autorskie wnioski, jak i propozycje nowych koncepcji teoretycznych są bardzo dojrzałe i zasługują na dostrzeżenie, niemniej jednak recenzent może odczuć pewien niedosyt w zakresie dyskusji naukowej i odwołań do innych badaczy. We wnioskach dysertacji, oprócz klasycznego podsumowania i wniosków badawczych, Autor wyraźnie określił ograniczenia badawcze, jakie związane są z przeprowadzonym przez Niego procesem badawczym w zakresie wnioskowania, jednak należy podkreślić, że autor nie określił kierunków dalszych badań w tej tematyce, co niewątpliwie świadczy o szybkim przygotowaniu rozprawy doktorskiej.

Referat Nowicki

Podjęta problematyka badawcza jest nadal relatywnie nowatorska w naukach technicznych w zakresie mechaniki ruchu wiropłatu. Dynamika ruchu wiropłatu jest jednym z wiodących wątków badawczych w dziedzinie mechaniki lotu wiatrakowców. Problematyka dynamiki ruchu i redukcji energii wytwarzanej na wiropłacie wymaga prowadzenia pogłębionych badań z perspektywy nauk o mechanice i aerodynamice lotu, stąd wybór tematyki rozprawy oraz jej głównego celu należy uznać za właściwy krok w początkowym etapie kariery naukowej Doktoranta.

Na podstawie obserwacji, badań symulacyjnych oraz studiów literaturowych Doktorant umiejętnie dostrzegła zatem lukę badawczą, a zarazem podjął próbę badania redukcji energii powstającej w trakcie ruchu wiropłatu. Podjęta przez mgr inż. Tytusa Tulwina tematyka jest niezmiernie ważna dla teorii, a zwłaszcza dla działalności naukowej pracowników badawczych.

Celem głównym recenzowanej dysertacji jest „opracowanie modelu matematycznego uwzględniającego wpływ odległości pomiędzy współosiowymi wirnikami na zużycie energii pojedynczych wirników jak i sumarycznego zużycia energii” (s. 28). Po lekturze rozprawy, jestem przekonany, że zakładany cel główny, zostały osiągnięty przez Doktoranta.

Całość rozprawy, jak już wcześniej podkreśliłem w swojej recenzji, została ukierunkowana na realizację celu i weryfikację sformułowanej w rozdziale 2 tezy.

Mgr inż. Tytusa Tulwin w realizowanej rozprawie udowodnił, że możliwa jest redukcja zużycia energii wiropłata poprzez modyfikację przepływu powietrza przez rotory.

W mojej opinii najważniejszą częścią rozprawy są rozdziały od 3 do 4, w których Autor przedstawia obiekty badań, metodykę, zakres oraz wyniki badań poczynając od oceny obciążenia mocy wirnika, sprawności. Doktorant wyznaczył siły ciągu, oraz moc badanych wirników. Dużym walorem jakościowym pracy doktorskiej jest również wykreślenie charakterystyk obciążeniowych wirników w czasie lotu.

Analiza pracy wskazuje, że przeprowadzone badania były czasochłonne i wymagały nakładu pracy dużego zespołu - przygotowanie aparatury i metodyki przeprowadzenia testów rzeczywistych. Przedstawione przez Doktoranta wyniki badań, przeprowadzone na danych rzeczywistych ukazały możliwości zmniejszenia wytwarzanej energii na wiropłacie. Co ważne, przeprowadzone badania w tym

zakresie, dały podstawę do uzasadnienia potrzeby rozszerzenia badań na inne konstrukcje wiroplątów przy określeniu innych warunków środowiskowych..

Wskazane zastosowania oraz kierunki dalszych badań opracowanej metody świadczą nie tylko o oryginalności podejścia, ale również wpisania się w lukę badawczą z tego obszaru. Przytoczone fakty wskazują, że Doktorant zrealizował cel rozprawy i udowodnił tezę. Za główne osiągnięcia mgr inż. Tytusa Tulwina uważam:

1. Opracowanie zależności zmniejszającego się wpływu pierwszego wirnika na kolejny wraz ze zwiększającą się separacją osiową. Wyniki dobrze skalują się w postaci bezwymiarowej, zgodnie z regułą liczby podobieństwa Reynoldsa.
2. Opracowanie modelu obliczeniowego wielowirnikowego wiropląta o współosiowym ustawieniu wirników został zweryfikowany z badaniami rzeczywistymi co pozwoliło na szerokie przeprowadzenie analizy dla dużej ilości przypadków.
3. Zastosowanie współosiowego dwuwirnikowego w układzie o rozstawieniu wirników  $z/D > 25$  powoduje zmniejszenie zużycia energii o 24% i wydłużenie czasu zawisu o 30%, przy dużym obciążeniu wirnika  $DL = 17,13 \text{ kg/m}^2$ . Zaobserwowano zmniejszenie zużycia energii o 16% już przy separacji  $z/D=A$ . Wykonane porównania odnoszą się do przypadku o jednym wirniku nośnym i tej samej generowanej się nośnej.
4. Opracowanie metody wykorzystania wielu współosiowych wirników nośnych jeszcze bardziej zmniejsza zużycie energii wiropląta, prowadząc nawet do 55% redukcji zużycia energii i 86% wydłużenia czasu lotu, w porównaniu do przypadku o jednym wirniku nośnym i tej samej generowanej sile nośnej. Przedstawiony przypadek występuje przy obciążeniu dysku wirnika  $DL = 17,13 \text{ kg/m}^2$ , separacji  $z/D = 20$  i liczbie wirników  $n = 10$ .

Podsumowując uważam, że omówiona konstrukcja rozprawy oraz sposób opracowania materiału empirycznego, a także forma przeprowadzonej analizy i przyjęta metodyka badań są właściwe dla tego rodzaju prac. Autor dokonał

Referat Łowicki

właściwej prezentacji wyników swych badań, opisał je oraz nadał ich wynikom charakter danych przydatnych dla zastosowania w praktyce.

Mgr inż. Tytus Tulwin wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w reprezentowanej dyscyplinie nauki, dobrą znajomością przedmiotu badań, umiejętnością analitycznego spojrzenia na rozpatrywany problem oraz opanowaniem metod eksperymentalnych stosowanych w dyscyplinie *Inżynieria Mechaniczna*. Te aspekty świadczą o właściwym przygotowaniu mgr inż. Tytusa Tulwina do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Oprócz niewątpliwych walorów pracy wskazanych powyżej ma ona słabą stronę do której należy przede wszystkim język rozprawy doktorskiej. W pracy pojawiają się błędy terminologiczne oraz usterki o charakterze merytorycznym jak również błędy edycyjne, co wpływa na jakość stylistyczną rozprawy. Należy dodać, że w analizie wykresów pudełkowych umieszczonych w rozdziale 3 pominięto oszacowania wartości minimalnych i maksymalnych analizowanych danych. W rozdziale 5 Podsumowanie i wnioski na samym końcu jest materiał poświęcony analizie stanu wiedzy co zostało zrobione z poruszonego tematu w publikacjach naukowych. Pragnę zaznaczyć że ten opis powinien być zamieszczony w podrozdziale gdzie omówiono aktualny stan wiedzy.

## 5. Pytania szczegółowe i uwagi krytyczne

Chociaż całość pracy jest czytelna i ogólnie spójna, to szczegółowa analiza treści rozprawy rodzi kilka pytań szczegółowych. Odpowiedzi na poniższe pytania oczekuję podczas publicznej obrony:

1. Badania stanowiskowe omówione w rozdziale drugim i trzecim pozwalają na uzyskanie charakterystyk aerodynamicznych oraz badanie osiąarów wiropłatów. Jednak proszę zwrócić uwagę, że badania rzeczywiste pozwalają na walidację założeń projektowych, jak również wyników badań otrzymanych w drodze analizy numerycznej. Testy te powinno wykonywać na odpowiednio przeskalowanych i geometrycznie podobnych modelach z zachowaniem, istotnych dla danego typu badań, liczb kryterialnych. I mając te kryteria na uwadze nasuwa się pytanie: Jak wyglądał proces badania wiropłatów w aspekcie wyznaczania osiąarów wiropłatów na stanowisku

Referat Gowchik

- pomiarów? Proszę również wskazać jakie parametry czy wielkości można było zmierzyć a jakie parametry były nie możliwe do określenia.
2. Z przedstawionych fotografii stanowiska pomiarowego widać, że wykorzystywano geometryczne odwzorowanie z uwzględnieniem zmniejszonej skali modelu i w celu zachowania prędkości końca łopaty (kryterium Liczby Macha) na wirnikach modelowych konieczne jest zwiększenie prędkości obrotowej. Stawia to przed badaczem szereg trudności związanych z zaadoptowaniem do modelu, wykorzystywanych w rzeczywistości rozwiązań konstrukcyjnych wraz z zastosowaniem tych samych materiałów. Proszę odpowiedzieć jak ten problem został rozwiązany przez doktoranta na etapie badań laboratoryjnych.
  3. Na etapie przeskalowania geometrycznego wiropłatu podlegają wszystkie charakterystyczne wymiary, a w szczególności: wymiar liniowy, położenie osi wahań, kąt stożka łopaty. Proszę doktoranta o odpowiedź na pytanie jak przygotowano wiropłata do badań stanowiskowych.
  4. W dalszej części proszę, aby doktorant ustosunkował się do pytania czy wyznaczono maksymalne obciążenia wiropłatu, a jeśli tak to ile wynosiło to obciążenie.
  5. Czy w trakcie badań stanowiskowych powstawało zjawisko flatteru wynikające poprzez stosowanie równomiernego doważenia w nosku łopaty i zapewniając tym samym położenie środka masy poszczególnych przekrojów łopaty przed środkiem parcia.
  6. Na stronie 67 doktorat napisał, że do wyznaczenia optimum zastosowano solver ewolucyjny. Proszę o bardziej sprecyzowanie czego dotyczy to „optimum” i omówić dlaczego wybrano ten solver.

## 6. Uwagi krytyczne i inne

Rozprawa została napisana poprawnym językiem technicznym. Jej główny mankament stanowi brak odwołań przy wzorach prezentowanych we wszystkich rozdziałach pracy. O ile w rozdziale czwartym wzory stanowią własne

Refat Nowak



wyprowadzenie modelu matematycznego o tyle w podrozdziale, w którym omówiono aktualny stan wiedzy jest to niewątpliwe uchybienie ze strony autora.

W pracy występują błędy edycyjne, których przykłady przedstawiono poniżej. W żaden jednak sposób nie wpływają one na wysoką wartość przedstawionej do recenzji pracy.

Błędy edycyjne:

1. Brak wstawienia akapitu w części pracy doktorskiej.
2. Rysunek 1.3 oznaczenia osi są w języku angielskim, rysunek 1.2 część opisu jest po angielsku, druga część po polsku.
3. Strona 32 powinno być o częstotliwości taktowania 120 MHz
4. Strona 38 powinno być kV, bo to jest to jednostka wskazująca na ilość obrotów silnika bezszczotkowego na każdy 1 Volt, a jest „KV”
5. W całej dysertacji – zarówno przy wzorach, jak i przy opisie teoretycznym metod pomiarowych nie ma odwołań do literatury.
6. Brak referencji występuje również przy wzorach występujących w rozdziale 7.
7. Rozdział 2.3 powinien być nazwany inaczej ponieważ odzwierciedla treści w nim zawartej.
8. Podpis tabeli 4.1 powinien brzmieć: Parametry techniczne współosiowych wirników, a nie „Parametry ogólne modelu matematycznego”
9. Użycie kolokwializmów oraz używanie nieprecyzyjnego języka do opisu zjawisk. np.: „zależy od wielu czynników”

## 7. Wniosek końcowy

Uważam, że zawarte w recenzji drobne uwagi krytyczne, czy zastrzeżenia absolutnie nie zmniejszają merytorycznej wartości naukowej i aplikacyjnej recenzowanej rozprawy. W mojej opinii stanowi ona oryginalne rozwiązanie przez Autora zagadnienia naukowego, sformułowanego w tezie badawczej. Rozprawę uważam za interesującą zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

Znaczenie podjętej problematyki zarówno w wymiarze naukowym jak i praktycznym, wysoki poziom trudności oraz stopień realizacji celu uzasadniają stwierdzenie, że rozprawa stanowi oryginalne podejście do problematyki oceny uciążliwości

środowiskowej spalinowych pojazdów trakcyjnych. Praca mieści się w obszarze badań właściwym dla dyscypliny naukowej *Inżynieria Mechaniczna*.

Uwagi merytoryczne przedstawione w punkcie 2 opinii o pracy nie zmieniają ogólnej pozytywnej oceny recenzowanej dysertacji. Stwierdzam, że Mgr inż. Tytusa Tulwin opracował interesujące naukowo i oryginalne modele redukcji energii wiropłata oraz wykazała na drodze badań teoretycznych redukcji energii na wiropłacie poprzez modyfikację przepływu powietrza przez rotory.

Założenia modelu opracowanego przy zastosowaniu metody symulacyjnych uzyskały potwierdzenie w wynikach przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Mając powyższe na uwadze, stwierdzam jednoznacznie, że dysertacja pt.: *"Redukcja zużycia energii wiropłata poprzez modyfikację przepływu powietrza przez rotory"* autorstwa mgr inż. Tytusa Tulwin spełnia warunki ustawowe stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie Autora do dalszego toku przewodu doktorskiego.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że **recenzowana rozprawa doktorska spełnia wszystkie wymagania** przewidziane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2003 r. oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora.

**Wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Lubelskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.**



dr hab. inż. Rafał Kowalik, prof. LAW

