

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. Pawła Ruchały**

**nt. „Niestacjonarne oddziaływanie aerodynamiczne pomiędzy śmigłowcem a lądowiskiem
wyniesionym”**

promotor: prof. dr hab. Romana Ratkiewicz-Landowska

promotor pomocniczy: dr inż. Adam Dziubiński

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję opracowano na prośbę Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, będącą konsekwencją Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny z dnia 02.02.2022 r. (pismo o sygnaturze RNDIM/521/4/2022 z dnia 07.02.2022).

Ocena wyboru tematu

Śmigłowce stanowią specyficzną grupę statków powietrznych, charakteryzujących się unikalnymi właściwościami użytkowymi. Najważniejszą zaletą śmigłowca jest zdolność do wykonywania pionowego startu i lądowania oraz zawisu. Pozwala to na realizację całej grupy zadań, niedostępnej dla innych statków powietrznych. Oprócz zastosowań wojskowych, największą grupę zadań realizowanych przez śmigłowce cywilne, stanowią zadania ratownicze oraz transportu medycznego. Mimo, że śmigłowce charakteryzują się dużo gorszymi wskaźnikami energetycznymi od samolotów i z tego powodu ich użytkowanie jest zdecydowanie droższe, to jednak ich unikalne właściwości operacyjne sprawiają, że śmigłowce są w ograniczonym stopniu również wykorzystywane w transporcie pasażerskim. Dotyczy to w szczególności lotów wykonywanych w obszarach dużych miast, charakteryzujących się niską

efektywnością transportową innych środków transportu powierzchniowego lub w rejonach o małej dostępności lotnisk tradycyjnych.

Wykorzystywanie śmigłowców do transportu medycznego, ratownictwa oraz transportu pasażerskiego, wiąże się z konieczności budowy lądowisk w wysoko zurbanizowanych obszarach dużych miast. Ze względu na deficyt odpowiednich terenów pod budowę lądowisk, często umieszcza się je na dachach budynków lub w innych wyniesionych lokalizacjach. Skutkuje to dodatkowym problemem, związanym z interferencją aerodynamiczną pomiędzy lądującym lub startującym śmigłowcem, a lądowiskiem znajdującym się np. na dachu budynku, przy uwzględnieniu różnych warunków wiatrowych. Interferencja aerodynamiczna wpływa nie tylko na nieustalone wymuszenia, którym podlega śmigłowiec, utrudniając manewry w pobliżu lądowiska oraz zwiększając ryzyko ich wykonywania, ale jest także źródłem dodatkowych obciążeń jakim podlega budynek jako całość, poszczególne jego elementy konstrukcyjne i infrastrukturalne oraz samo lądowisko dla śmigłowca. Zjawiska te muszą być uwzględniane przy planowaniu podejść do lądowania i kierunków odlotu śmigłowca, oraz przy projektowaniu budynków przeznaczonych do lokalizacji lądowisk na ich dachach oraz innych wyniesionych powierzchniach.

Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Ruchały dotyczy więc, bardzo ważnej i aktualnej problematyki wyznaczania niestacjonarnych obciążeń aerodynamicznych, działających na powierzchnię lądowiska pod startującym lub lądującym śmigłowcem.

W dostępnej literaturze naukowej, zjawiska interferencji pomiędzy śmigłowcem w fazie startu lub lądowania oraz podłożem są analizowane na poziomie dużej ogólności. Analizy jakościowe, dotyczą charakteru zjawisk, często przy założeniu ich stacjonarności. Brak jest szczegółowych analiz ilościowych, opisujących wielkości niestacjonarnych obciążeń aerodynamicznych działających zarówno na śmigłowiec, jak i na podłoże lub lądowisko wyniesione, dla niewielkich odległości pomiędzy tarczą wirnika a powierzchnią lądowiska, typowych w tych fazach.

Praca doktorska mgr inż. Pawła Ruchały odpowiada więc na istotne zapotrzebowanie, dotyczące określenia wielkości obciążeń jakim poddawane są lądowiska wyniesione i budynki na których są lokalizowane, w wyniku oddziaływania śmigłowca w różnych warunkach atmosferycznych. Wyniki tych analiz mogą stanowić podstawę do opracowania wymagań dla projektantów lądowisk wyniesionych oraz budynków na których będą one lokalizowane.

Ocena merytoryczna

Mimo, że historia rozwoju wiroplątów jest równie długa jak samolotów z nieruchomymi skrzydłami, to jednak większa złożoność konstrukcyjna oraz dużo trudniejsze w analizie zjawiska wynikające z fizyki ich lotu sprawiły, że szybki rozwój techniki śmigłowcowej nastąpił zdecydowanie później, dopiero po drugiej wronie światowej. Rozwój zaawansowanych metod obliczeniowych i doświadczalnych, pozwolił na doskonalenie konstrukcji śmigłowców, w celu

poprawy efektywności i bezpieczeństwa lotu. Jednak rozwój śmigłowców związany jest nie tylko z rozwojem ich konstrukcji, ale także infrastruktury dodatkowej w postaci np. lądowisk wysoko wyniesionych. Wyższe wymagania jakie muszą spełniać obiekty oraz znajdujące się na nich lądowiska, wynikają między innymi z dodatkowych obciążeń generowanych przez startujące i lądujące śmigłowce. Dotychczasowe analizy ograniczały się głównie do określania obciążeń ustalonych dla śmigłowców znajdujących się na dosyć dużej wysokości nad lądowiskiem (co najmniej 1.0R). Wynikało to z ograniczonych do niedawna możliwości obliczeniowych oraz pomiarowych. Rozwój technik obliczeniowych daje szansę na dokładniejsze przanalizowanie zjawisk związanych ze startem lub lądowaniem śmigłowca z uwzględnieniem oddziaływań nieustalonych.

Autor pracy podjął się analizy oddziaływań aerodynamicznych pomiędzy śmigłowcem a lądowiskiem, w zakresie niewielkiej odległości pomiędzy tarczą wirnika a powierzchnią lądowania. Analiza została oparta na wynikach badań doświadczalnych oraz symulacji numerycznych. Strona metodologiczna pracy nie budzi zastrzeżeń. Na podstawie studium literatury oraz wstępnych badań dotyczących śladu aerodynamicznego wirnika śmigłowca, Autor sformułował tezę badawczą pracy. Udowodnienie postawionej tezy wymagało opracowania planu badań, którego realizacja miała umożliwić osiągnięcie zidentyfikowanych celów badawczych i udowodnienie postawionej tezy. Zarówno plan badań jak i cele badawcze należy uznać za właściwe i kompletne. Zaplanowane badania eksperymentalne i symulacje były niezbędne do osiągnięcia celów badawczych i potwierdzenia prawdziwości sformułowanej tezy.

Wszystkie prace zaplanowane do realizacji w ramach pracy doktorskiej miały charakter badawczy, ukierunkowany na poszerzenie wiedzy na temat nieustalonego oddziaływania aerodynamicznego wirnika śmigłowca na powierzchnię lądowiska. Pierwszym etapem prac były badania modelowe, wykonane z wykorzystaniem modelu śmigłowca T-REX 450 z wirnikiem nośnym o średnicy 0.7 m. W ramach badań zmierzony został rozkład ciśnień na powierzchni ustawionej prostopadle do osi wirnika, w zmiennych odległościach: 0.5R, 1.0R oraz 1.5R. Następnie Autor wykonał pomiary rozkładu prędkości w śladzie aerodynamicznym wirnika nośnego z wykorzystaniem metody PIV. W drugim etapie badań Autor dokonał pomiarów rozkładu ciśnienia w śladzie aerodynamicznym rzeczywistego wirnika nośnego śmigłowca ILX-27, o średnicy 7.9 m. Ostatnim etapem badań doświadczalnych był pomiar przyspieszeń jakim podlega lądowisko wyniesione śmigłowca, w fazie lądowania, wykonany na rzeczywistym obiekcie w trakcie lądowania śmigłowca EC-135. Wnioski ze wszystkich etapów badań pozwoliły na wykazanie prawdziwości postawionej tezy oraz na wyciągnięcie wniosków szczegółowych oraz wniosków natury ogólnej. Zastosowane metody badawcze praktycznie w całości należą do grupy metod empirycznych, na które składały się badania eksperymentalne (badania modelu, badania wirnika rzeczywistego oraz badania przyspieszeń lądowiska) oraz badania symulacyjne z zastosowaniem systemu Ansys Fluent.

Analizy przepływowe wykorzystują model płynu rzeczywistego, którego ruch opisany jest równaniami Naviera-Stokesa. Przybliżone rozwiązanie równań Naviera-Stokesa odbywa się z wykorzystaniem komercyjnego systemu obliczeniowego Ansys Fluent, uwzględniającego oddziaływania pomiędzy płynem i poruszającym się w nim nieodkształcalnym obiektem. Analizy CFD pozwoliły na wstępne określenie zjawisk aerodynamicznych towarzyszących kształtowaniu się strumienia za wirnikiem nośnym śmigłowca, pracującym w niewielkiej odległości od lądowiska.

Przedstawione przez Autora wyniki i wnioski stanowią ważny krok w kierunku poznania fizyki oddziaływania aerodynamicznego pomiędzy wirnikiem śmigłowca, pracującym w pobliżu lądowiska a otoczeniem zewnętrznym. Rozbieżności uzyskanych wyników metodami doświadczalnymi oraz symulacyjnymi zostały właściwie zinterpretowane, stanowiąc cenne wskazówki przy planowaniu dalszych badań. Pozyskana wiedza już teraz pozwala na uwzględnianie dodatkowych czynników przy projektowaniu wyniesionych lądowisk śmigłowcowych. Dalsze badania mogą zaowocować opracowaniem zestawu wymagań i norm do projektowania tego typu lądowisk i budynków na których będą umieszczane.

Uwagi szczegółowe

Praca zawarta została na 155 stronach i składa się 6 rozdziałów merytorycznych, wprowadzenia, zakończenia oraz spisów ilustracji, tabel, wykazu oznaczeń, spisu literatury oraz streszczenia.

We wstępie Autor określił cel i zakres pracy oraz scharakteryzował najważniejsze problemy, wiążące się oddziaływaniem strumienia zawirnikowego śmigłowca na powierzchnię lądowiska. Następnie Autor dosyć szeroko zarysował perspektywy rozwoju transportu wykorzystującego śmigłowce, zarówno związanego z ratownictwem medycznym jak i lotami komercyjnymi. Rozwój transportu śmigłowcowego wiąże się z koniecznością budowy odpowiednich lądowisk, których większość jest lub będzie zlokalizowana na dachach budynków lub w innych miejscach wyniesionych powyżej powierzchni gruntu. Również w Polsce występuje stale rosnące zapotrzebowanie na nowe lądowiska śmigłowcowe, z których część powstaje w lokalizacjach wyniesionych.

W dalszej części wstępu, autor dosyć szczegółowo opisał zjawiska aerodynamiczne występujące w trakcie lotu śmigłowca, skupiając się na oddziaływaniach wynikających z efektu przyziemnego. Zjawiska aerodynamiczne towarzyszące opływowi lądowisk wyniesionych, wynikające z oddziaływania wiatru w połączeniu z oddziaływaniem strumienia zawirnikowego śmigłowca wykonującego start, lądowanie lub zawis, zostały szczegółowo przeanalizowane na podstawie dostępnych danych literaturowych. Analizie poddane zostały również podstawowe zjawiska aerodynamiczne dotyczące kształtowania się strumienia zawirnikowego śmigłowca, z uwzględnieniem efektów niestacjonarnych. W końcowej części rozdziału, Autor dokonał przeglądu i klasyfikacji metod modelowania stosowanych do opisu najważniejszych zjawisk

aerodynamicznych związanych z lotem śmigłowca, w zależności od celu prowadzonych badań. Jednym z ważniejszych, poruszanych aspektów, było skalowanie wyników oraz możliwość wykorzystywania badań modelowych. Rozdział został podsumowany przeglądem najważniejszych metod badań aerodynamicznych śmigłowca, z opisem stosowanych narzędzi i technik oraz analizą ich zalet i wad oraz charakterystyką zakresu stosowalności.

W rozdziale drugim sformułowana została teza badacza rozprawy. Autor założył, że istnieje możliwość oszacowania pól zmiennych obciążeń aerodynamicznych, występujących pomiędzy nisko usytuowanym śmigłowcem nad lądowiskiem wyniesionym a otoczeniem zewnętrznym. Teza opiera się o wyniki badań literaturowych Autora, wskazujące na brak dostatecznego opisu ilościowego zjawisk interferencji aerodynamicznej pomiędzy lądującym lub startującym śmigłowcem a podłożem, lub lądowiskiem wyniesionym.

Rozdział trzeci zawiera opis zastosowanej metodyki badań. Badania zostały przeprowadzone dla trzech obiektów. Pierwszym obiektem badań był model śmigłowca T-REX 450 z dwułopatowym wirnikiem nośnym o średnicy 0.7 m. Drugim obiektem badań był dwułopatowy wirnik bezprzegubowy, pochodzący ze śmigłowca ILX-27, o średnicy 7.9 m, badany na stanowisku „Rotunda”. Trzecim obiektem badań był śmigłowiec EC-135 dla którego wykonano pomiary drgań rzeczywistego lądowiska wyniesionego, w trakcie lądowania śmigłowca. Autor zamieści w rozdziale pełną charakterystykę obiektów badań oraz opisał szczegółowo stanowiska do badań modelu T-REX 450 wraz zastosowanym oprzyrządowaniem pomiarowym. Wirnik T-REX badany był również z wykorzystaniem metody PIV, gdzie w charakterze cząstek znacznikowych wykorzystano mgłę cząstek oleju utworzoną za pomocą generatora posiewu. Wirnik pełnowymiarowy badany był na stanowisku do badań wirników pełnowymiarowych „Rotunda”, znajdującym się w Instytucie Lotnictwa w Warszawie. Aranżacja stanowiska pozwoliła na przeprowadzenie badań tylko dla jednej wysokości wirnika ponad gruntem, równej jego promieniowi. W przypadku obu wirników mierzony był ciąg, moment obrotowy, prędkość obrotowa wirnika oraz moc napędowa. Dla wirnika pełnowymiarowego, wyniki pomiarów pozwoliły na określenie warunków badań oraz odpowiedniego zakresu zmian kątów natarcia łopat. Większość analizowanych parametrów wyznaczana była metodą pomiaru pośredniego. Dlatego szacowanie niepewności pomiaru odbywało się z wykorzystaniem prawa propagacji niepewności, zarówno w wariancie dla parametrów nieskorelowanych jak i z uwzględnieniem korelacji pomiędzy nimi. Wstępne wyniki badań pozwoliły na określenie niepewności pomiarów dla obu stanowisk, obrazowane w postaci słupków niepewności wyznaczanych dla mierzonych parametrów.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań modelu T-REX 450. W pierwszej części rozdziału zaprezentowane zostały pomiary rozkładu ciśnień dla wirnika znajdującego się na wysokościach: 0.5R, 1.0R oraz 1.5R nad podłożem. Dla każdej z wysokości wykonano pomiary rozkładu ciśnień, dla skoku ogólnego w zakresie od 0 do 10 stopni. Wyznaczona krzywa sprawności wirnika FM w funkcji współczynnika ciągu CT, pokazała wyraźny wpływ bliskości

ziemi na wartość sprawności FM. Dalej przeprowadzono analizę zależności współczynnika ciśnienia CP od czasu, a następnie od położenia azymutalnego wirnika ψ i numeru obrotu. Zmiany współczynnika ciśnienia CP wykazują przebieg bliski okresowości dla wysokości wirnika 0.5R, z dwoma maksimumami, wynikającymi liczby łopat. Dla większych wysokości wirnika, przebiegi współczynnika CP wykazują większą zależność od czasu (brak wyraźnej okresowości). W celu wyznaczenia częstotliwości zmian współczynnika ciśnienia, jego zmiany zostały rozłożone na składowe harmoniczne za pomocą szybkiej transformaty Fouriera. Widma częstotliwości współczynnika ciśnienia dla punktów pomiarowych na kierunku prostopadłym do płaszczyzny symetrii kadłuba, i dla różnych wysokości wirnika nad powierzchnią gruntu, pokazały zmianę charakteru obciążenia lądowiska w zależności od wysokości zawisu śmigłowca. W celu uproszczenia prowadzonych analiz, Autor zaproponował zestaw parametrów w postaci średniego współczynnika ciśnienia, średniego współczynnika ciśnienia dla zawisu oraz względnej amplitudy oscylacji i względnej amplitudy oscylacji dla zawisu, jako miary stacjonarnego i niestacjonarnego obciążenia aerodynamicznego płyty lądowiska. Rozkłady średniego współczynnika ciśnienia oraz względnej amplitudy oscylacji, dla różnych wysokości wirnika nad lądowiskiem i dla różnych kątów skoku, pozwoliły ocenić wielkości wartości ww. współczynników oraz ich położenie w funkcji odległości od osi obrotu.

W drugiej części rozdziału 4 przedstawiono wyniki pomiarów pola prędkości strumienia indukowanego przez wirnik, z wykorzystaniem metody PIV. Pomiarów zostały wykonane dla wysokości wirnika nad podłożem, równiej 1.0R. Wyznaczono pole prędkości dla dwóch obszarów obserwacji: tzw. pełny widok oraz zbliżenie końcówki łopaty wirnika. Ze względu na ograniczenia zestawu pomiarowego, prędkości wyznaczone w przekroju (2D). Analiza otrzymanych wyników pozwoliła na identyfikację osi wirów brzegowych oraz określenie teoretycznej ścieżki ich wędrówki. Otrzymane rezultaty są zgodne z wynikami rozkładów ciśnienia otrzymanych na podstawie wcześniejszych pomiarów.

Rozdział zawiera wyniki badań wirnika śmigłowca ILX-27, o średnicy 7.9 m, na stanowisku „Rotunda”. Badania miały na celu potwierdzenie wiarygodności badań wykonanych na małym modelu T-REX, oraz wykazanie przydatności badań modelowych w wyznaczaniu bezwymiarowych charakterystyk pracy wirników śmigłowcowych. Pomiarów rozkładu ciśnienia na lądowisku dokonano w punktach odległych od siebie o 0.125R, począwszy od odległości 0.5R do końcówki łopaty znajdującej się w odległości 1.0R. Punkty pomiarowe nie znajdowały się na powierzchni gruntu, lecz ze względu na możliwość technicznej realizacji znajdowały się na belce, na wysokości 0.5m ponad powierzchnią gruntu. Podobnie jak dla wirnika T-REX wyznaczono rozkłady średniej wartości współczynnika ciśnienia oraz rozkłady amplitudy oscylacji. Wyniki wskazały, że w pewnych obszarach lądowiska, amplituda oscylacji ciśnienia znacząco przekracza jego wartość średnią. Jest to istotną wskazówką przy wyznaczaniu obciążenia powierzchni lądowiska od strumienia zawirnikowego śmigłowca. Dokonano również transformacji Fouriera poszczególnych współczynników ciśnienia.

Częstotliwości poszczególnych składowych odniesiono do częstotliwości obrotu wirnika. Analiza pozwoliła na określenie maksimów i położenia maksimów ciśnienia oraz amplitudy poszczególnych składowych harmonicznych.

Niestacjonarne oddziaływanie lądującego śmigłowca na lądowisko wyniesione przeanalizowane zostało rozdziale 6. Analiza dokonana została na podstawie pomiarów drgań, przeprowadzonych dla lądowania śmigłowca Eurocopter EC-135 na lądowisku wyniesionym w Szpitalu MSWiA w Olsztynie. Dzięki jednoosiowym czujnikom przyspieszeń umieszczonych w wybranych punktach konstrukcyjnych lądowiska, zarejestrowane zostały przyspieszenia w trakcie lądowania śmigłowca. Następnie wyznaczono współczynniki korelacji pomiędzy odchyleniem standardowym przyspieszeń a wybranymi parametrami lotu śmigłowca zapisanymi przez pokładowy rejestrator lotu. W efekcie analizy powstała macierz korelacji pomiędzy analizowanymi parametrami lotu śmigłowca, wskazująca które parametry wpływają w najistotniejszy sposób na amplitudę drgań lądowiska.

Rozdział 7 zawiera poszerzoną dyskusję otrzymanych wyników, z próbą porównania wyników modelowych z wynikami rzeczywistego wirnika oraz wynikami zarejestrowanymi podczas rzeczywistego lądowania śmigłowca na lądowisku wyniesionym. Ze względu na ograniczenia stanowiska pomiarowego, oraz odmienne warunki eksperymentów, wyniki otrzymane dla śmigłowca T-REX 450 oraz dla wirnika rzeczywistego badanego na stanowisku „Rotunda”, nie mogą być wprost porównywane. Punkty pomiarowe na stanowisku „Rotunda” zostały umieszczone na wysokości 0.5 m ponad powierzchnią gruntu. W celu oceny tego wpływu zbudowany został model uproszczony układu w środowisku Fluent, a następnie wyznaczono rozkłady prędkości i ciśnień w śladzie wirnika z wykorzystaniem metody objętości skończonych. Opracowany model pozwolił określić różnice pomiarów wynikające z specyfiki rozmieszczenia czujników ciśnienia na stanowisku pomiarowym. Autor dokonał również porównania wyników CFD z wynikami pomiarów eksperymentalnych, dla tych samych warunków oraz zinterpretował najbardziej prawdopodobne przyczyny występujących różnic. Następnie przeprowadził porównanie wyników badań wirnika modelowego z wynikami badań wirnika pełnowymiarowego. Charakter zmian współczynników ciśnienia oraz względnej amplitudy jest zbliżony, a różnice wartości liczbowych wynikają z odmiennych warunków badań i innej aranżacji stanowisk badawczych. W końcowej części rozdziału Autor dokonał próby porównania wyników badań modelowych, z wynikami badań wirnika pełnowymiarowego oraz wynikami zarejestrowanymi w trakcie rzeczywistego lądowania śmigłowca EC-135. Ze względu na zbyt małą ilość wielkości mierzonych w trakcie lądowania rzeczywistego śmigłowca oraz dużą zmienność parametrów lotu wynikającą ze specyfiki realizacji manewru lądowania, porównanie ma charakter czysto jakościowy, a konkluzje raczej przyjmują postać hipotez.

Rozdział 8, stanowiący zakończenie pracy, zawiera podsumowanie i wnioski oraz propozycje dalszych prac. W podsumowaniu i wnioskach Autor odnosi się do najważniejszych kwestii

dotyczących prowadzonych badań. Formułuje 7 najważniejszych wniosków oraz szereg zaleceń zapewniających zgodność badań modelowych z badaniami prowadzonymi na obiektach rzeczywistych. Propozycje dalszych prac dotyczą zarówno analizowanego zagadnienia jak i przewidywanych kierunków rozwoju techniki śmigłowcowej.

Rozdział 9 zawiera spis 91 pozycji 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 śmigłowców.

Ocena strony edytorskiej

Praca napisana jest językiem poprawnym i precyzyjnym. Strona edytorska pracy spełnia najwyższe 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 poprawnie zdefiniowane. Materiały ilustracyjne oraz tabele, zamieszczone w pracy w sposób właściwy i logiczny uzupełniają opisywane treści.

Jedynie uwagi krytyczne dotyczą bardzo nielicznych pomyłek językowych oraz braku skali na rysunku nr 88, na stronie 117.

Konkluzje

Przedstawioną do recenzji pracę oceniam bardzo dobrze i uważam że została wykonana na bardzo wysokim poziomie merytorycznym. Zawarte w niej treści dotyczą złożonych problemów oddziaływania aerodynamicznego pomiędzy wirnikiem nośnym śmigłowca a lądowiskiem, dla niewielkiej wysokości lotu. Celem pracy było określenie nieustalonych obciążeń aerodynamicznych, wynikających z rozkładu ciśnień generowanych przez pracujący wirnik w niewielkiej odległości od powierzchni lądowiska. 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 zostać wykorzystane w praktyce. Zawarte w rozprawie badania i analizy są przeprowadzone na wysokim poziomie merytorycznym, a ich wyniki rozszerzają wiedzę z zakresu oddziaływania aerodynamicznego wirnika na powierzchnię lądowiska, w fazie startu i lądowania śmigłowca.

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

- uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy, które wynika z bieżących potrzeb dotyczących szczegółowego określenia nieustalonych obciążeń aerodynamicznych działających na

budynki i umieszczone na nich lądowiska wyniesione w fazie startu lub lądowania śmigłowca,

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

Biorąc pod uwagę istotność i aktualność tematyki pracy doktorskiej, osiągnięte wyniki badawcze a także ich duże znaczenie naukowe oraz praktyczne stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Ruchały spełnia ustawowe warunki merytoryczne i formalne stawiane pracom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Uwzględniając wysoki poziom merytoryczny rozprawy, w tym nowatorstwo i oryginalność przeprowadzonych prac badawczych oraz pozostały dorobek publikacyjny w skład którego wchodzi 15 artykułów naukowych, w tym praca opublikowana w czasopiśmie Aircraft Engineering and Aerospace Technology (IF=0.975), wnoszę do Wysockiej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o przyznanie wyróżnienia przedłożonej mi do oceny rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Pawła Ruchały.

Mejlsz Andzej