

Dr hab. inż. Paweł Flaszynski, prof. IMP PAN
Zakład Aerodynamiki
Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk
Tel: 58 6995 268
E-mail:pflaszyn@imp.gda.pl

Gdańsk, 2022-05-12

Recenzja pracy doktorskiej

mgra inż. Pawła Ruchały

pt.: „Niestacjonarne oddziaływanie aerodynamiczne pomiędzy
śmigłowcem a lądowiskiem wyniesionym”

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie decyzji Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej oraz pisma, nr RNDIM/521/2/2022 z dnia 07.02.2022, przesłanego przez Pana prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

1. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

Praca doktorska Pana mgra inż. Pawła Ruchały została zredagowana na 155 stronach. Materiał diskutowany w pracy ujęto w 9 rozdziałach, gdzie ostatni jest spisem literatury zawierającym 91 pozycji. Pierwszy rozdział poprzedzony jest spisem rysunków, tabel, symboli i skrótów wykorzystanych w pracy.

Celem pracy, który został przedstawiony we wstępie pierwszego rozdziału, jest wyznaczenie niestacjonarnych obciążeń aerodynamicznych na powierzchnię lądowiska pod startującym lub lądującym śmigłowcem. Wobec rozwijającego się lotnictwa i koncepcji znanej jako Urban Air Mobility to zagadnienie staje się coraz bardziej istotne ze względu na konieczność budowy lądowisk w obszarach zabudowanych, które najczęściej są integralnym elementem budynków. Lądowiska są często lokalizowane na dachach jako tzw. lądowiska wyniesione. Do tej pory większość budowanych tego typu lądowisk stanowią lądowiska przyszpitalne. Jednak biorąc pod uwagę cele strategiczne jakie dla lotnictwa wyznacza ACARE (Advisory Council for Aviation Research in Europe) w dokumencie „Flight Path 2050 Europe’s Vision for Aviation” oraz obecne trendy wskazujące na rozwój lotnictwa prywatnego oraz bezzałogowego można spodziewać się, że zapotrzebowanie na budowę i dostępność lądowisk wyniesionych będzie rosła. Ocena niestacjonarnych obciążeń aerodynamicznych jest ważnym etapem w procesie przygotowania projektu architektonicznego, ponieważ błędne wyznaczenie obciążeń dynamicznych może prowadzić do obniżenia komfortu użytkownika, a w najgorszym przypadku do uszkodzeń lub zniszczeń powodowanych obciążeniem zmęczeniowym. Należy także podkreślić problem bezpieczeństwa śmigłowca znajdującego się w pobliżu lądowiska, który jest poddawany lokalnym podmuchom lub oddziaływaniu struktur wirowych silnie zależnych od konfiguracji zabudowań oraz kierunku wiatru.

Wobec powyższego można stwierdzić, że wybrana tematyka ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne oraz spełnia kryteria prac w ramach dyscypliny „inżynieria mechaniczna”.

W pierwszej części pierwszego rozdziału pracy Doktorant charakteryzuje ładowiska wyniesione i na tym tle, w kolejnej części, przedstawia cechy charakterystyczne struktur przepływu w otoczeniu ładowisk wywołanych wiatrem oraz generowanych przez wirnik śmigłowca. Omówione struktury wirowe i cechy przepływu w analizowanym przypadku wskazują na złożoność badanego zagadnienia. W dalszej części rozdziału przedstawione są wybrane aspekty modelowania oraz metody badań aerodynamiki śmigłowców. Doktorant krótko charakteryzuje modelowanie dynamiki struktury oraz aerodynamiki wirnika śmigłowca, a następnie przedstawia wybrane liczby kryterialne oraz definicje najważniejszych współczynników charakteryzujących śmigłowiec. W części prezentującej metody badań wymienia podstawowe techniki pomiarowe umożliwiające wyznaczanie sił, pomiary ciśnienia statycznego lub całkowitego, a także polowe lub punktowe pomiary prędkości (PIV lub CTA). Wśród metod pomiaru prędkości Doktorant wymienia metodę schlierena (czyli tzw. metodę smugową), co nie jest poprawne, ponieważ ta metoda umożliwia detekcję i wizualizację obszarów o niezerowych gradientach gęstości. Uzyskany obraz daje duże możliwości analizy struktury przepływu, ale sama metoda nie może być wykorzystana do wyznaczania prędkości.

Po wprowadzeniu do analizowanego zagadnienia, w drugim rozdziale Doktorant formułuje tezę: „Istnieje możliwość oszacowania pól zmiennych obciążeń aerodynamicznych w oddziaływaniu na otoczenie śmigłowców użytkowanych na ładowiskach wyniesionych”.

Kolejny rozdział zawiera informacje dotyczące badanych obiektów, zdalnie sterowanego śmigłowca T_REX 450 z dwupłatowym wirnikiem Hillera o średnicy 0.7 m oraz dwupłatowego wirnika bezprzegubowego o średnicy 7.9 m testowanego na stanowisku „Rotunda”. Na stanowisku „Rotunda” badano zmodyfikowany wirnik śmigłowca ILX-27. W tym rozdziale Doktorant omawia wykorzystane stanowiska i metody pomiarowe oraz przedstawia metodę szacowania niepewności pomiaru. W końcowej części tego fragmentu pracy Doktorant zaznacza, że niepewność pomiaru współczynnika ciągu jest kilkukrotnie wyższa dla wirnika modelowego, niż pełnowymiarowego.

W rozdziale 4 omówione są wyniki badań wirnika modelowego. Badania przeprowadzono dla trzech odległości wirnika od ładowiska: 0.5R, 1R i 1.5R (R – promień wirnika). Dla każdej wysokości analizowano wpływ skoku ogólnego w zakresie 0° do 10°, z pominięciem przypadków charakteryzujących się najmniejszym ciągiem. Analiza wyników podzielona jest na dwie części. W pierwszej przedstawiono pomiary ciśnienia i analizę współczynnika ciśnienia, a w drugiej Doktorant analizuje strukturę przepływu w obszarze wirnika w oparciu o pomiar pola prędkości. Komentując rozkład średniego współczynnika ciśnienia oraz względnej amplitudy oscylacji na Rys.58-59, Doktorant stwierdza, że dla najmniejszej wartości skoku oraz najniższego położenia wirnika, pomimo największych oscylacji ciśnienia przypadek ten nie jest krytyczny ze względu na relatywnie niską wartość obciążenia całkowitego. Nasuwa się pytanie, czy jednak niestacjonarność działających sił nie jest w tym przypadku bardziej istotna niż całkowite średnie obciążenie aerodynamiczne? To niestacjonarne pole ciśnienia generuje obciążenie zmęczeniowe konstrukcji, które może być przyczyną uszkodzeń konstrukcji ładowiska oraz drgań struktury. Interesujące wyniki przedstawiono na kolejnych rysunkach prezentując średni współczynnik ciśnienia i względną amplitudę oscylacji ciśnienia w funkcji położenia promieniowego i współczynnika ciągu. Niestety poza krótką analizą wyników zabrakło dyskusji wskazującej na przyczyny tego rodzaju nierównomierności.

Bardzo interesujące są pomiary prędkości przy pomocy PIV. Doktorant prezentuje pola prędkości w wybranej płaszczyźnie w dwóch obszarach, większym obejmującym ładowisko i mniejszym, w którym analiza koncentruje się wokół końcówki łopaty. Wykonane pomiary umożliwiły identyfikację struktur wirowych oraz wyznaczenie ścieżki wirów wierzchołkowych. Doktorant wyznaczył także funkcję opisującą ścieżkę teoretyczną. Na końcu tego rozdziału analizuje położenie wirów w funkcji czasu i wysokości nad podłożem. Wydaje

się, że mając takie dane można byłoby przeprowadzić analizę intensywności wirów oraz częstotliwości ich występowania w pobliżu lądowiska, a następnie skorelować z pomiarem fluktuacji ciśnienia. Taka informacja mogłaby być przydatna w sformułowaniu wniosków umożliwiających optymalne projektowanie lądowiska, a może nawet próbę aktywnego sterowania i osłabiania oddziaływania wirów na lądowisko.

Wyniki badań wirnika pełnowymiarowego na stanowisku „Rotunda” przedstawiono w rozdziale 5. Porównanie wyników badań obu wirników zostało zamieszczone w dalszej części pracy (rozdział 7.2). Na rys. 104 pokazano rozkład współczynnika ciśnienia wzdłuż promienia dla wybranego współczynnika ciągu. Przebieg obu krzywych wskazuje na podobny charakter zmian, natomiast różnice wartości maksymalnych Doktorant wyjaśnia „mniejszą intensywnością strumienia odbitego od powierzchni podłoża”. Niestety nie jest jasne, co należy rozumieć jako „odbicie strumienia od podłoża”. Analiza względnej amplitudy oscylacji wykazuje różnice zmienności wzdłuż promienia. Doktorant wyjaśnia, że te różnice mogą być spowodowane warunkami w jakich prowadzone były badania, a w szczególności czynnikami atmosferycznymi lub obecnością siatki ograniczającej stanowisko. Dodatkowo czujniki na stanowisku „Rotunda” były umieszczone na belce powyżej powierzchni lądowiska, co dało efekt podobny do zmniejszenia wysokości nad podłożem. Zagadnienie jest złożone, ze względu na wzajemną interakcję struktur wirowych i ich oddziaływanie z podłożem, więc zmiana położenia punktów pomiarowych wpływa na wartości mierzonych oscylacji. Natomiast, warto się zastanowić, czy w przypadku badań modelowych na stanowisku laboratoryjnym nie można umieścić czujników w położeniu takim jak na stanowisku „Rotunda”, co pozwoliłoby na uogólnienie wniosków.

Unikatowym elementem pracy są pomiary drgań podczas lądowania śmigłowca na lądowisku wyniesionym w szpitalu MSWiA w Olsztynie. Tutaj brakuje jednoznacznej informacji, czy Doktorant był współautorem badań, czy odnosi się do pozycji literatury [90] i wykorzystuje opublikowane wyniki pomiarów do analizy w oparciu o pomiary ciśnień dla wirnika modelowego i pełnowymiarowego. Niemniej jednak, porównanie jest interesujące i wykazuje, że dominujące znaczenie ma częstotliwość wirowania łopat.

Oprócz badań eksperymentalnych, Doktorant przedstawia wyniki obliczeń przepływu trójwymiarowego wirnika na stanowisku „Rotunda”. Obliczenia wykonano programem Ansys/Fluent, ale brakuje podstawowych informacji dotyczących modelu obliczeniowego takich, jak definicja obszaru obliczeniowego, zagęszczenie siatki obliczeniowej, sformułowane warunki brzegowe, zastosowane schematy numeryczne, krok czasowy, czy podstawowe informacje dotyczące zbieżności procesu obliczeniowego. Wyniki obliczeń wskazują na wyraźną zmianę współczynnika ciśnienia wraz z wysokością nad powierzchnią lądowiska oraz zgodność trendu zmian tego współczynnika wzdłuż promienia z wartościami mierzonymi. Niestety wyznaczona numerycznie względna amplituda oscylacji ciśnienia nie wykazuje tej zgodności.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie wykonanych prac oraz wnioski potwierdzające tezę. Ostatecznie Doktorant wskazuje także słabsze strony prowadzonych badań lub formułuje nowe pytania, które mogą być podstawą dalszych prac.

2. Uwagi szczegółowe

Poza uwagami w pierwszej części recenzji nasuwają się poniższe spostrzeżenia i pytania.

1. Na str. 69 jest stwierdzenie wskazujące na taśmę antyerozyjną działającą turbulizująco na warstwę przyścienną jako przyczynę przeciągnięcia wirnika. Z reguły różnego rodzaju „turbulizatory” wpływają pozytywnie na rozkład prędkości w warstwie przyściennej

opóźniając początek oderwania. Jak należy rozumieć stwierdzenie zawarte w pracy? Jaki mechanizm fizyczny Doktorant ma na myśli?

2. Niepewność pomiaru ciśnienia na stanowisku wirnika modelowego jest dużo większa niż pełnowymiarowego. Doktorant wyjaśnia, że „Jest to efekt zastosowania tych samych czujników ciśnienia, pomimo kilkukrotnie mniejszych wartości ciśnienia, niż na stanowisku „Rotunda” (str.77). Dlaczego zastosowano takie czujniki, a nie odpowiednie dla badanego zakresu ciśnienia?
3. Doktorant używa sformułowania „przepływ odbity” (np. str. 87) – Co ono oznacza?
4. Rys. 58-59 – Czy przedstawiona różnica wskazująca na zaobserwowany wyższy poziom oscylacji ciśnienia ze zmianą wysokości z $h/R=1$ na $h/R=1.5$, w odróżnieniu od przypadku z niższym skokiem ogólnym (Rys.58) jest efektem aerodynamicznym, czy wynikiem dokładności pomiaru? Jaka jest dokładność pomiaru tych przypadków?
5. Na rys. 73 wyraźnie widoczny jest wpływ skoku ogólnego na rozkład C_p w obu kierunkach („S” i „L”). Jak wyjaśnić mniejszą różnicę C_p pomiędzy „S” i „L” w zakresie r/R od 0.7 do 1 dla skoku 8° , niż dla 7° i 9° ?
6. Na rys. 76 został zidentyfikowany wir brzegowy spływający z końcówki łopatki sterującej. Dlaczego ten wir ma przeciwny kierunek do wiru na końcówce łopaty wirnika? Chyba, że po zmianie zakresu skali na rysunku będzie wyraźniej widać zakres wartości i okaże się, że wiry wierzchołkowe generowane przez końcówkę łopaty mają ten sam znak, ale niższą intensywność. Proszę o komentarz.
7. Na str. 129 znalazło się stwierdzenie: „w obliczeniach wykorzystano model turbulencji k- ω SST, automatycznie dobierający parametr odwzorowania turbulencji w warstwie przyściennej”. Proszę o wyjaśnienie tego sformułowania.
8. Na str. 134 Doktorant pisze: „porównanie wykonane podczas innego obrotu nie byłoby adekwatne”. Jak uzasadnić, że wybór obrotu, dla którego wartości C_p są zbliżone do obliczeniowych, jest poprawny? Dlaczego nie zdecydowano się na wartości średnie z kilku obrotów? Proszę o pokazanie wykresy na rys. 103 z naniesionymi punktami pomiarowymi.
9. Porównując współczynnik ciśnienia dla wirnika modelowego i pełnowymiarowego Doktorant zwraca uwagę na wpływ belki wyhamowującej przepływ indukowany (str. 137), co wpływa na istnienie różnic pomiędzy wirnikami. Brakuje jednak informacji jak duża jest belka, stosunek jej powierzchni czołowej (w kierunku normalnym do wirnika) do powierzchni wirnika. Czy belka jest na tyle duża, aby tak silnie oddziaływać na przepływ indukowany?
10. Na str. 139 Doktorant wyjaśnia, że oscylacje o niskiej częstotliwości mogą wynikać z obecności struktur wirowych o rozmiarze rzędu średnicy wirnika występujących wzdłuż powierzchni podłoża. Proszę o komentarz, skąd taki wniosek i proszę o wyjaśnienie jakie struktury wirowe Doktorant ma na myśli, które wywołują tak duże zmiany współczynnika C_p ?

11. Doktorant stwierdza, że wyniki pomiarów dla wirnika pełnowymiarowego są zaszumione (rys. 108), zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości, co może być efektem wiatru i turbulencji atmosferycznej. Czy zostały wykonane pomiary z unieruchomionym wirnikiem, aby ocenić wpływ wspomnianych czynników atmosferycznych?

3. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pan mgr inż. Paweł Ruchała osiągnął założone cele. Przedstawione wyniki pomiarów i obliczeń umożliwiają ocenę oddziaływania przepływu indukowanego przez wirnik nośny śmigłowca na podłoże, a w analizowanym przypadku na lądowisko wyniesione. Obciążenia dynamiczne konstrukcji wywołane niestacjonarnością generowanych struktur wirowych wpływają na drgania konstrukcji, co może powodować uszkodzenia zmęczeniowe, a z pewnością obniżać komfort osób przebywających w otoczeniu takiego lądowiska. Prezentowane wyniki są inspiracją dla dalszych badań nad niestacjonarnymi oddziaływaniami, a uwagi krytyczne zawarte w recenzji nie obniżają wartości naukowej pracy doktorskiej i nie wpływają na moją pozytywną opinię.

Uważam, że praca doktorska Pana mgra inż. Pawła Ruchały pt.: „Niestacjonarne oddziaływanie aerodynamiczne pomiędzy śmigłowcem a lądowiskiem wyniesionym” w pełni odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

