

Recenzja

Pracy doktorskiej mgr. inż. Adama SIERADZKIEGO p.t.: „Analiza właściwości nośnego wirnika śmigłowca z uwzględnieniem efektów aeroelastycznych”

1. Podstawa Opracowania

Zlecenie Dyrektora Instytutu lotnictwa – Umowa o dzieło nr 343/ZU/2017/APZA

2. Zakres pracy

Podjęty przez Doktoranta problem badania właściwości nośnego wirnika śmigłowca z uwzględnieniem efektów aeroelastycznych jest zagadnieniem złożonym z punktu widzenia naukowo – badawczego i niezwykle ważnym ze względów użytkowych.

Wyniki badań przedstawione w pracy, a w szczególności opracowane algorytmy numeryczne mogą być wykorzystywane przez konstruktorów oraz inżynierów eksploatujących śmigłowce, jak również pracowników naukowych lotnictwa.

Do budowania algorytmów i modeli obliczeniowych wirnika nośnego śmigłowca, Doktorant wykorzystał komercyjny solver równań Naviera-Stokesa zawarty w systemie ANSYS Fluent oraz model belkowy łopaty. Walidację modelu przeprowadził w głównej mierze na podstawie modeli wirników śmigłowców: IS-2 i UH-60A dla warunków zawisu oraz lotu poziomego. Prowadził również weryfikację metody na podstawie wirnika teoretycznego Ormiston.

Praca liczy 206 stron, składa się z dziewięciu rozdziałów (niektóre z nich są krótkie i bardzo krótkie – jednostronicowe), w tym wstępu, podsumowania i wniosków końcowych, streszczeń w języku polskim i angielskim, spisu rysunków i tabel, wykazu ważniejszych oznaczeń, spisu literatury oraz załącznika przedstawiającego charakterystyki masowe i sztywnościowe łopat wirników wykorzystywanych w symulacjach.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym „Wstęp” i drugim zatytułowanym „Przegląd literatury”, przedstawiono ogólną charakterystykę zjawisk aeroelastycznych w samolotach, z podziałem na problemy statyczne i dynamiczne. Dalej Doktorant omówił zjawiska jakie

występują na wirnikach śmigłowców. Za literaturą przytoczył następujące zjawiska: dywergencję, klasyczny flutter giętno-skrętny, flutter przekręceń i wahań łopat, niestateczność ruchu przekręceń i odchyłeń łopaty, flutter oderwania, falowanie łopat, rezonans naziemny i powietrzny.

Dalsza część tego rozdziału dotyczy analizy numerycznej aerodynamiki wirnika śmigłowcowego wykorzystującej tzw. metodę pasową (metodę Drzewieckiego) i „Analizę numeryczną wirników przy użyciu solverów równań Naviera-Stokesa-CFD”. Aerodynamika śmigłowców jest bardzo złożona ze względu na ruch obracających się wirników, niesymetryczny opływ, jak i dużą elastyczność łopat.

Głównym problemem analizy strukturalnej śmigłowca jest wyznaczenie odkształceń i przemieszczeń łopat. Najczęściej obecnie ten problem rozwiązuje się wykorzystując metodę elementów skończonych. Rozdział ten kończy opis analizy numerycznej wirnika śmigłowcowego z uwzględnieniem efektów aeroelastycznych – przegląd metod. Omówione przeze mnie te dwa rozdziały napisane są „trudnym” językiem, powstały na podstawie bardzo bogatej literatury zamieszczonej w pracy. Pewne zdania brzmią w sposób sztuczny. Trzeba przyznać, że Doktorant ma w niej dobre rozeznanie.

W rozdziale trzecim postawiono tezę pracy, która brzmi: „Zastosowanie uproszczonego modelu strukturalnego łopat (modelu belkowego) oraz uproszczonego aerodynamicznego wirnika (bazującego na VBM oraz stacjonarnej analizie przepływu), umożliwia przeprowadzenie symulacji pracy wirnika śmigłowcowego z uwzględnieniem wpływu odkształcalności łopat na osiągi wirnika”.

Rozdział czwarty poświęcony jest budowie modelu strukturalnego sprowadzającego się do wyprowadzenia równań ruchu drgań giętno-skrętnych elementu obracającej się łopaty. Wybrano model Eulera – Bernoulliego (klasyczna teoria belek). Doktorant podkreślił, że: „W celu poprawy czytelności, za pomocą kolorów rozróżniono w prezentowanych wyprowadzeniach człony odpowiedzialne za różne rodzaje sił / momentów.”. Moim zdaniem osiągnął efekt przeciwny – może już nie ten wzrok u recenzenta. Na tej podstawie Doktorant opracował solver BDS (Blade Deformation Solver), wykorzystując metodę różnic skończonych jako jedną z metod numerycznego całkowania równań różniczkowych. W tym momencie nie odniósł się do wielu prac krajowych, gdzie wykorzystywano problemy sprzężonych drgań giętno-skrętnych łopat wirnika nośnego i samolotów o dużym wydłużeniu skrzydła, stosując metodę elementów skończonych.

Testowanie solvera przeprowadzono dla przypadku statycznego i dynamicznego obciążenia belki zamocowanej wysięgnikowo. Uzyskano dobrą zgodność z wynikami analitycznymi (testowano belkę o stałych parametrach masowych i sztywnościowych, pokrywających się środków mas i sztywności w przekrojach). Dalsza część tego rozdziału dotyczy budowy modelu aerodynamicznego wirnika nośnego tzw. modelu Virtual Blade Model (VBM). Model VBM jest jednym z najpopularniejszych sposobów modelowania wirnika śmigłowca w symulacjach przepływu typu RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). Polega to na tym, że każda z łopat nie jest modelowana w modelu przepływu, ale są one zastąpione dyskiem wirnika. W wyniku takiego modelowania otrzymujemy skok ciśnienia na dysku wirnika, który zmienia swoje wartości wraz z promieniową i azymutową konfiguracją położenia.

Na stronie 71 pracy Doktorant napisał: „oryginalny model VBM do programu ANSYS Fluent jest dostępny na prośbę użytkownika u dostawcy oprogramowania ANSYS. Niestety nie jest on pozbawiony błędów programistycznych. W dalszej części pracy bazowano na znacznie zmodyfikowanym modelu VBM, w którym poprawiono lub dodano następujące funkcje:” (w tym miejscu Doktorant je wymienia). Nie jest jasne czy autorem tych poprawek jest Doktorant, proszę o wyjaśnienie. Rozdział ten kończą opisy modeli opartych o rzeczywistą geometrię łopat.

Rozdział piąty dotyczy opisu i integracji modułu uproszczonego (VBM + BDS) i dokładnego (MDM + BDS) do obliczeń aerodynamicznych i odkształceń łopat.

Rozdział szósty to analiza przypadków obliczeniowych. Dotyczą one modelu wirnika w skali 1:3,23 lekkiego śmigłowca IS-2, wirnika śmigłowca UH-60A Black Hawk i wirnika teoretycznego Ormiston, zaprojektowanego specjalnie do celów weryfikacji i porównania metod obliczeniowych.

Badania doświadczalne Doktorant przeprowadził w tunelu T3 Instytutu Lotnictwa jedynie dla modelu wirnika śmigłowca IS-2. Dla pozostałych dwóch wirników zebrał dane o ich parametrach geometrycznych. W przypadku wirnika UH-60A zebrał bogatą literaturę z badań doświadczalnych w tunelach światowych. W ten sposób powstała unikalna baza danych obejmująca nie tylko przypadki ustalone (zawis, lot poziomy), ale również różnego rodzaju manewry (zakręty, wyrwania, itp.). Baza ta wykorzystywana jest do walidacji wielu rozwiązań uzyskanych metodami numerycznymi. W rozdziale tym Doktorant wyznaczył częstości drgań własnych wirującej łopaty śmigłowca UH-60A przy nominalnej prędkości obrotowej wirnika wynoszącej 258 obr/min. Obliczenia zostały przeprowadzone programem

BDS. Uzyskane wyniki porównano z wynikami literaturowymi, wykazując ich dobrą zgodność. Podobnie dobrą zgodność uzyskano podczas testowania wirnika Ormiston.

W rozdziale siódmym p. 7.1 przeprowadzono analizę numeryczną przy użyciu standardowego modułu VBM oraz zaprezentowanego modułu VBM + BDS rozszerzonego o analizę ruchów i odkształceń łopat. Wyniki analiz numerycznych zostały porównane z danymi z badań tunelowych. Rezultaty uzyskane przy użyciu opracowanego modułu VBM + BDS są znacznie bliższe wynikom eksperymentalnym niż w przypadku standardowego VBM.

Paragraf 7.2 dotyczy analizy numerycznej trzech wyżej omówionych wirników, dokładnym modelem obliczeniowym, wykorzystującym model aerodynamiczny wyższego rzędu MDM oraz solverem BDS. Rozdziały ósmy i dziewiąty zawierają opis możliwości wykorzystania opracowanych modułów obliczeniowych w procesie projektowania wirnika śmigłowcowego oraz podsumowanie i wnioski końcowe. Cenną rzeczą jest spis literatury i załącznik, w którym zebrano charakterystyki łopat wirników wykorzystywanych w symulacjach.

3. Ocena pracy

Niniejsza praca poświęcona jest analizie wirnika nośnego śmigłowca z uwzględnieniem efektów aeroelastycznych. Nie chodzi tutaj o badanie statycznych czy dynamicznych problemów aerosprężystości, polegających na wyznaczaniu prędkości krytycznych, przy których te zjawiska występują, lecz o wpływ elastyczności wirnika na współczynniki charakterystyk aerodynamicznych sił i momentów.

Badania numeryczne Doktorant prowadził z wykorzystaniem komercyjnego systemu ANSYS Fluent, natomiast do prowadzenia badań doświadczalnych wykorzystywał tunele aerodynamiczne Instytutu Lotnictwa.

Praca ma charakter aplikacyjny o dużym znaczeniu praktycznym. Jak Doktorant napisał w rozdziale dziewiątym „Główną motywacją do podjęcia tematu była potrzeba opracowania metody obliczeniowej, której koszt obliczeniowy i wymagane nakłady pracy pozwalałyby na wykorzystanie jej we wczesnych etapach projektowania”. Istotą pracy jest to, iż składa się z części obliczeniowej i doświadczalnej, które wzajemnie się uzupełniają. Uzyskane wyniki porównał z wynikami prac zamieszczonych w bardzo obszernym spisie literatury. W ramach pracy opracował model belkowy elementu łopaty, który z zastosowaniem metody różnic skończonych stosował do analizowania sprzężonych problemów aerosprężystości. Poprawność działania systemu testował na trzech modelach wirników nośnych. Jeden

odpowiadał wirnikowi śmigłowca IS-2, drugi wirnikowi śmigłowca UH-60A Black Hawk, a trzeci tzw. teoretycznemu wirnikowi Ormistona.

W tabeli 9.1 Doktorant przedstawił zalety i wady opracowanego modułu obliczeniowego VBM+BDS. Pisząc o metodzie MDM + BDS opartej o odkształcalne siatki, przy pomocy których otrzymuje się bardzo dokładne rozwiązanie pola przepływu wokół łopat, stwierdza: „Potencjalnie metoda ta jest w stanie zasymulować skomplikowane dynamiczne zjawiska aeroelastyczne (np. flutter oderwania), co w przypadku modułu opartego na modelu VBM jest niemożliwe”. Interesujące byłoby porównanie uzyskanych wyników z bogatymi wynikami prac krajowych, np. dla klasycznego flutteru. Takiego porównania w pracy nie zauważyłem, a szkoda, bo umiejętności naukowe i erudycja Doktoranta są duże.

Zauważyłem w pracy (a może się mylę) słabe odnoszenie się Doktoranta do polskich opracowań z przeszłości. Jest dla mnie również mało zrozumiałą sprawą, dlaczego Doktorant nie posiłkował się polskojęzyczną literaturą rodem z Instytutu Lotnictwa, WAT, PW. Taka literatura istnieje i odpowiada zakresowi pracy. Nie zacytowanie dokonań prof. K. Szumańskiego chociażby w jednym miejscu pracy uważam za poważne przeoczenie. Nie powiązanie tego nazwiska z rozdziałem czwartym przy jednoczesnym zamieszczaniu rys. 4.1, 4.10, czy elementarnych wzorów 4.11 i 4.12 jest nie zrozumiałe dla człowieka starszego pokolenia.

Interesuje mnie, czy model wirnika śmigłowca IS-2 badany w tunelu spełnił kryteria podobieństwa dynamicznego i w jaki sposób je zrealizowano?

Przedstawiona rozprawa zawiera efektywne rozwiązanie ważnego zagadnienia naukowego. Jej istotną cechą jest fakt, że może być wykorzystana w wielu innych obszarach techniki lotniczej.

Autor mgr inż. Adam Sieradzki rozwiązał postawione zagadnienie stosując nowoczesne metody obliczeniowe oraz aparat matematyczny odpowiadający współczesnym pracom doktorskim. Zastosowanie nowoczesnych technik komputerowej mechaniki płynów – CFD do badania właściwości nośnego wirnika śmigłowca z uwzględnieniem efektów aeroelastycznych podkreśla duże umiejętności Doktoranta w zakresie badań numerycznych. Wyniki pracy są wartościowe z punktu widzenia badań teoretycznych stanów statycznych i dynamicznych wirników. Sam zaś sposób ich przedstawienia w zastosowaniach do prac inżynierskich budzi pewien niedosyt.

Rozprawa pod kątem graficznym opracowana jest starannie, występują pewne żargony słowne i skróty myślowe wynikające z tłumaczenia z języka angielskiego. Ogólnie, wskazuje na duży zasób wiedzy Doktoranta.

4. Wnioski

Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr. inż. Adama Sieradzkiego w zakresie badania problemów wirników nośnych śmigłowców, recenzowaną rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Zasluguje ona na ocenę bardzo dobrą. Praca spełnia wymagania stawiane przez ustawę „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” i może stanowić podstawę dopuszczenia do egzaminu i publicznej obrony.