

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Sieradzkiego

p.t. „*Analiza właściwości nośnego wirnika śmigłowca z uwzględnieniem efektów aeroelastycznych*”

I. Ocena wyboru tematyki, celu i zakresu badań.

Opiniowana rozprawa doktorska jest pracą teoretyczną podejmującą złożony problem sprzężonej aerodynamiki i odkształceń sprężystych nośnego wirnika śmigłowca, której celem jest budowa wiarygodnego i efektywnego narzędzia obliczeniowego wspomagającego inżyniera w pracach nad nowymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi i optymalizacyjnymi zmierzającymi do poprawy osiągnięć i bezpieczeństwa lotu wiropłata.

Obserwowany w ostatnich dziesięcioleciach olbrzymi postęp w rozwoju sprzętu obliczeniowego, metod automatycznej generacji siatek, metod dyskretnego modelowania zjawisk i procesów oraz rozwój algorytmów szybkiego przetwarzania danych doprowadził do powszechnej dziś akceptacji symulacji komputerowej jako jednego z podstawowych narzędzi obliczeniowych inżyniera-konstruktora i badacza. Rozwój ten jest od lat stymulowany przez światowy przemysł lotniczy, samochodowy, odlewniczy i chemiczny, to jest te gałęzie gospodarki, w których choćby częściowe zastąpienie kosztownych i długotrwałych testów laboratoryjnych i prototypowania przez wykorzystanie relatywnie szybkiego i taniego modelowania wirtualnego może znacznie przyspieszyć wprowadzenie nowego produktu na rynek, udoskonalić i zoptymalizować technologię.

W tym okresie powstało szereg komercyjnych kodów do wszechstronnej i precyzyjnej analizy strukturalnej i aerodynamicznej maszyn i systemów (np. MSC Nastran, Adina, ANSYS, ANSYS Fluent), w tym aeroelastyczności obiektów latających (np. RDYNE, DYMORE, CAMRAD II). Problemem w ich implementacji, zwłaszcza na etapie projektowania interaktywnego i optymalizacji, jest czasochłonność i kosztochłonność obliczeń. Z tych względów aktualne są dziś prace nad poszukiwaniem alternatywnych narzędzi obliczeniowych bazujących na modelach uproszczonych, ale wiarygodnych, tj. zweryfikowanych pod względem ich matematycznej dokładności i wiernie odtwarzających najważniejsze cechy modelowanych zjawisk.

Zrealizowane przez Doktoranta badania, obejmujące budowę, weryfikację i eksperymentalne uwiarygodnienie nowych proponowanych modeli symulacji komputerowej aerosprężystości nośnego wirnika śmigłowca, oparte na połączeniu uproszczonego belkowego modelu odkształceń łopaty oraz dwóch różnych modeli aerodynamiki przepływu, dobrze wpisują się w ten ogólnoswiatowy aktualny kierunek badań.

Fizyka przepływu i odkształceń strukturalnych wirnika jest bardzo złożona. W ruchu obrotowym na łopaty działają zmienne niesymetryczne siły aerodynamiczne, występują zjawiska przeciągnięcia dynamicznego, fale uderzeniowe, oddziaływania wirów spływających z końców łopat, znaczące są oddziaływania sił bezwładności, odśrodkowych i Coriolisa, łopaty o dużym wydłużeniu wykonując ruchy wokół przegubów ulegają znacznym deformacjom sprężystym. Obserwuje się różne postacie flutteru tj. niestateczności wynikające ze sprzężeń ruchów wahań, przekręceń i odchyłeń łopat, nieliniowo zmiennych z kątem natarcia charakterystyk siły nośnej

i momentu aerodynamicznego i inne. Te wzajemnie sprzężone dynamiczne zjawiska aerosprężyste decydują o osiąгах i bezpieczeństwie lotu wiroplata.

Z tych względów złożone są też modele symulacyjne aeroelastyczności wirnika nośnego. Silne wzajemne sprzężenia obciążeń łopat siłami aerodynamicznymi z ich odkształceniami sprężystymi wymaga jednoczesnej symulacji numerycznej zjawisk przepływowych, przy wykorzystaniu zaawansowanych metod obliczeniowej mechaniki płynów, rozwiązania na siatce dyskretnej równań dynamiki ruchu łopat oraz wzajemnego powiązania wyników obu tych analiz na każdym etapie obliczeń. Ponadto, ze względu na periodyczny charakter ruchu łopat ich geometria ulega ciągłym zmianom w locie postępowym śmigłowca, co wymusza stosowanie zaawansowanej techniki ruchomych bądź odkształcalnych siatek. Budowa symulatora numerycznego tych procesów wymaga więc zaawansowanej wiedzy z zakresu fizyki ośrodków ciągłych, aerodynamiki obiektów latających, analizy strukturalnej odkształcalnego obiektu, teorii modelowania matematycznego, metod symulacji komputerowej, programowania oraz wiedzy z zakresu budowy efektywnych algorytmów obliczeniowych.

Biorąc powyższe pod uwagę, z pełnym przekonaniem stwierdzam, że Doktorant podjął ambitne i trudne badania, których tematyka ma charakter dysertacyjny i aplikacyjny, jest zgodna ze współczesnymi ogólnościowymi trendami, a tytuł rozprawy w pełni oddaje jej treść.

II. Walory naukowe, oryginalność badań, ocena metod badawczych i uzyskanych wyników.

Opiniowana rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój teorii i zastosowań metod symulacji komputerowej złożonych i wzajemnie sprzężonych oddziaływań aerodynamicznych ruchomego powietrza i opływanego, sprężyste odkształcalnego wirnika nośnego wiroplata. Oryginalnym dorobkiem Doktoranta jest propozycja połączenia uproszczonego modelu strukturalnego, opartego na klasycznej teorii belki Eulera Bernoulliego, z uproszczoną symulacją ustalonej aerodynamiki wirnika, bazującą na modelu wirtualnej łopaty (VBM – *Virtual Blade Model*). W ten sposób powstało nowe efektywne narzędzie obliczeniowe wyznaczania obciążeń wirnika, odkształceń łopat i osiągow śmigłowca w zawisie i w locie poziomym z umiarkowaną prędkością, użyteczne w projektowaniu interaktywnym i optymalizacji - dzięki istotnie zmniejszonej czasochłonności i kosztocłonności obliczeń w porównaniu do innych oferowanych na rynku kodów.

W poszukiwaniu uzasadnienia postawionej w pracy tezy o możliwości przeprowadzenia wiarygodnej symulacji komputerowej aerodynamiki wirnika śmigłowego z uwzględnieniem odkształcalności łopat, przy wykorzystaniu uproszczonych efektywnych obliczeniowo modeli strukturalnego (opartego na teorii belki) i aerodynamicznego (opartego na teorii wirtualnej łopaty), Doktorant zbudował własny model obliczeniowy i przeprowadził szerokie badania nad jego dokładnością i wiarygodnością odwzorowania fizyki zjawisk.

W tym celu wyprowadził równania zastępczego belkowego modelu łopaty, opartego na klasycznej teorii Eulera-Bernoulliego, w najbardziej ogólnej postaci, tj. dla dowolnych położań środków mas przekrojów łopaty oraz jej osi skręceń. Są to równania wahań nieskończenie sztywnej łopaty i przemieszczeń elastycznej łopaty w płaszczyźnie ciągu, równanie skręcenia elastycznej łopaty oraz równanie odchylenia nieskończenie sztywnej łopaty w płaszczyźnie obrotów. Uzyskane równania różniczkowe cząstkowe na ugięcie, kąt wahań w płaszczyźnie ciągu, kąt skręcenia oraz kąt odchylenia w płaszczyźnie obrotu scałkował na regularnej siatce różnic skończonych w przestrzeni i czasie. Na tej podstawie opracował własny moduł obliczeniowy w języku C (nazywany w pracy BDS – *Blade Deformation Solver*) i uzupełnił o moduł dynamiczny do wyznaczania częstości i postaci drgań własnych przy wykorzystaniu szybkiej transformaty Fouriera. Potwierdził też dokładność obu modeli poprzez porównanie ich wyników z rozwiązaniem analitycznym dla statycznych ugięć i skręceń oraz częstości i postaci drgań własnych długiej belki wspornikowej o stałej sztywności na zginanie i skręcanie, pokrywających się środkach mas i sił

poprzecznych w przekroju oraz stałej masy względnej i masowego momentu bezwładności przekroju względem środka sił poprzecznych.

W poszukiwaniu możliwości przyspieszenia obliczeń aerodynamicznych wirnika Doktorant wykorzystał powszechnie stosowany i dostępny w kodzie Ansys Fluent model wirtualnej łopaty (VBM- *Virtual Blade Model*). Dokonał jego modyfikacji pozwalającej na uwzględnienie niezerowej siły nośnej na końcu łopaty zapewniającej płynną zmianę obciążenia w jej końcowej części. W celu uwzględnienia skosu łopaty na aerodynamikę przepływu zaproponował wprowadzenie do modelu efektywnej liczby Macha – w postaci iloczynu tej liczby wyznaczonej na podstawie prędkości przepływu równoległej do cięciwy profilu i kosinusa kąta skoku łopaty.

W celu połączenia uproszczonych modeli aerodynamicznego i strukturalnego Kandydat opracował iteracyjny algorytm wzajemnej wymiany danych pomiędzy modułami VBM i BDS, tj. informacji dotyczących całkowitego kąta nastawy, kąta ugięcia łopaty i sił dynamicznych wynikających z ruchu wahań łopaty, oraz pola prędkości przepływu przez dysk wirnika. Jego istotnym elementem jest zaproponowana oryginalna procedura interpolacji danych pomiędzy niestukturalną trój-wymiarową siatką obliczeń aerodynamicznych i regularną przestrzenno-czasową siatką belkowego modelu strukturalnego. Ponadto, ze względu na realizację obliczeń w różnych czasach w ustalonym modelu VBM i nieustalonym BDS konieczne było zamodelowanie tłumienia aerodynamicznego. Doktorant zaproponował tu algorytm aproksymacji tłumienia aerodynamicznego dla przemieszczenia łopaty w płaszczyznach ciągu i obrotów oraz model tłumienia w ruchu skrętnym proporcjonalnego do kwadratu prędkości kątowej przekręcenia łopaty.

W poszukiwaniu wzorców do weryfikacji dokładności opracowanego uproszczonego modułu obliczeniowego aeroelastyczności wirnika (VBM+BDS) Doktorant zaproponował połączenie belkowego modelu strukturalnego z dokładniejszą analizą aerodynamiczną opływu wirnika, opartą na możliwościach komercyjnego kodu ANSYS Fluent w zakresie symulacji nieustalonych turbulentnych przepływów metodą objętości kontrolnych oraz odwzorowania złożonych i zmiennych w czasie kształtów geometrycznych przy wykorzystaniu technik siatek ruchomych i odkształcalnych (MDM – *Moving Deforming Method*). Tak powstały model MDM+BDS umożliwia dyskretny opis rzeczywistych kształtów każdej z łopat i pozwala na odwzorowanie większości zjawisk aerodynamicznych mających wpływ na ruch i odkształcenie łopaty (takich jak oderwanie przepływu, fale uderzeniowe, interferencja aerodynamiczna, flutter oderwania, etc).

Weryfikacja dokładności analogu dyskretnego i zgodności jego wyników z modelowaną rzeczywistością jest coraz powszechniej rozumiana jako ostatni, ale jeden z najważniejszych, etapów budowy wirtualnych narzędzi analiz inżynierskich. Doktorant, świadom tego, przeprowadził kompleksową analizę wiarygodności obu proponowanych modeli aero-elastyczności wirnika nośnego śmigłowca - poprzez weryfikację ich dokładności i walidację na bazie porównań z dostępnymi w literaturze wynikami innych modeli symulacyjnych i badań eksperymentalnych dla trzech wybranych geometrii wirników, tj. dla modelu wirnika lekkiego śmigłowca IL-2, pełnowymiarowego wirnika śmigłowca Black Hawk UH-60A oraz teoretycznego wirnika Ormistona o symetrycznym profilu łopaty. Najpierw, by ocenić wpływ deformacji łopaty i związaną z tym zmianę jej aerodynamiki na osiągi śmigłowca zestawiał wyniki badań tunelowych z rezultatami obliczeń uzyskanych z dostępnego w Ansys Fluent modelu VBM oraz z własnego aerosprężystego modelu VBM+BDS. Analiza walidacyjna potwierdziła, że zmiany współczynnika ciągu, momentu obrotowego wirnika, sił prostopadłych do wału i momentu pochylającego w funkcji kąta skoku łopaty są znacznie bliższe rzeczywistym gdy uwzględni się odkształcalność łopaty. Przeprowadzona analiza modalna, w której porównano częstości i postaci drgań własnych wirującej łopaty uzyskane autorskim programem z odpowiednimi wielkościami otrzymanymi z innych symulatorów numerycznych, potwierdziły bardzo dobrą zgodność częstości postaci drgań własnych giętnych i skrętnych dla łopaty wirnika Ormistona oraz częstości drgań giętnych w przypadku wirnika UH-60A. Weryfikacja i walidacja modeli VBM +BDS i MDM+BDS

w przypadku wirników IS-2, UH-60A i teoretycznego wirnika Ormiston w stanie zawisu pokazała dobrą zgodność uzyskanych sił aerodynamicznych prostopadłych do płaszczyzny wirnika z eksperymentem i innymi obliczeniami. Dla wirnika UH-60A w locie poziomym osiągnięto zadawalającą zgodność wyników z modeli VDM+BDS oraz MDM+BDS z eksperymentem dla współczynników ciągu i mocy, ale istotne różnice wystąpiły w wielkościach momentów działających na wirnik oraz w wartościach sił w płaszczyźnie obrotów. Rozbieżności te Doktorant wyjaśnia niepełnymi danymi o założeniach modeli teoretycznych i niepewnością co do sposobów opracowania danych eksperymentach publikowanych w dostępnej literaturze.

Mgr inż. A. Sieradzki dokonał też szczegółowej analizy porównawczej opracowanych modułów VBM+BDS i MDM+BDS na podstawie wyników obliczeń aerodynamiki i odkształceń sprężystych łopat wirników IL-2, UH-60A i Ormiston. Uzyskane mapy konturowe ugięć łopaty, kąta deformacji skrętnej, siły normalnej, momentu aerodynamicznego, momentu gnącego i skręcającego przy takim samym kącie sterowania pokazały dobrą zgodność jakościową i wyraźne rozbieżności w wartościach sił działających na wirnik. Ponadto, porównanie wartości kątów deformacji skrętnej pokazało, że tylko model oparty na dokładnej reprezentacji geometrii opływanej łopaty wychwytuje oscylacje tego kąta (tj. zjawisko flatteru oderwania). Te słabości modelu wirtualnej łopaty (VBM) wynikają z przyjętych uproszczeń takich jak: wykorzystanie statycznych charakterystyk profilowych nie pozwalających na uwzględnienie zmian obciążeń aerodynamicznych i modelowanie oddziaływania struktur wirowych spływających z końców łopat w szybkim locie poziomym; oraz uśredniony charakter uzyskiwanego z modelu pola przepływu nie pozwalającego na wychwycenie promieniowych i kątowych zmian prędkości prostopadłej do dysku wirnika, różnic prędkości przepływu przed i za łopata oraz wyhamowania przepływu w płaszczyźnie wirowania łopat - efektów narastających wraz ze spadkiem liczby łopat, wzrostem średnicy wirnika, spadkiem prędkości obrotowej i wzrostem ciągu.

Na podstawie wnikliwych analiz porównawczych opracowanych modeli numerycznej symulacji aeroelastyczności nośnego wirnika śmigłowca oraz ich weryfikacji i walidacji na bazie dostępnych w literaturze wyników z innych modeli obliczeniowych i danych eksperymentalnych, Kandydat sformułował zalety i ograniczenia proponowanego modelu VBM+BDS oraz wskazał kierunki dalszych prac nad jego doskonaleniem. Oparty na połączeniu prostego belkowego modelu strukturalnego łopaty oraz powszechnie stosowanego aerodynamicznego modelu wirtualnej łopaty proponowany moduł symulacyjny odznacza się relatywnie niskim kosztem obliczeń, prostą siatką dyskretyzacji nie wymagającą modyfikacji przy zmianie geometrii łopaty oraz zadawalającą dokładnością w symulacji zawisu i powolnego lotu poziomego śmigłowca. Jednakże, wynikający z uśrednienia pola przepływu brak możliwości uwzględnienia przeciągnięcia dynamicznego i lokalnych efektów aerodynamicznych na końcu łopaty ogranicza zakres zastosowań do wczesnych etapów projektowania i optymalizacji wirnika nośnego w zawisie oraz locie poziomym z umiarkowanymi prędkościami. Dalsze prace nad rozwojem tego obiecującego, obliczeniowo efektywnego modelu powinny się więc koncentrować na wierniejszym odwzorowaniu dynamicznych zmian sił i momentów aerodynamicznych przez wykorzystanie eksperymentalnych charakterystyk przeciągnięcia dynamicznego. Drugi z opracowanych modeli, oparty na dokładniejszym rozwiązaniu pola przepływu w wirniku, przy wykorzystaniu odkształcalnych siatek podziału geometrycznego, pozwala na odwzorowanie lokalnych zjawisk aerodynamicznych wpływających na ruch i odkształcenia łopaty. Obliczenia są jednak bardzo czasochłonne i kosztowne. Dlatego w ramach dalszych prac nad tym modelem Doktorant przewiduje wykorzystanie najnowszej koncepcji nakładających się siatek regularnych (Chimera - dostępna w kodzie ANSYS Fluent), nie wymagających modyfikacji w każdym kroku czasowym, co pozwoli na znaczne przyspieszenie obliczeń.

W podsumowaniu, za znaczące osiągnięcie mgr inż. Adama Sieradzkiego uważam opracowanie i realizację oryginalnej koncepcji powiązania dwóch różnych modeli symulacyjnych, tj. opracowanego przez Doktoranta modelu i jego obliczeniowo efektywnego kodu komputerowego do analizy sprężystych odkształceń łopaty wirnika na bazie klasycznej teorii belki Eulera Bernoulliego oraz powiązanie go z jednym z dwóch różnych modeli aerodynamiki przepływu powietrza przez wirnik nośny śmigłowca, dostępnych w komercyjnym kodzie mechaniki płynów ANSYS Fluent. W ten sposób Doktorant uwzględnił wpływ wzajemnie sprzężonych oddziaływań sił aerodynamicznych i sprężystych na obciążenia i osiągi wirnika wiroplata oraz poszerzył bibliotekę narzędzi obliczeniowych inżyniera-konstruktora wykorzystywanych w projektowaniu interaktywnym i optymalizacji pracy tego urządzenia. Efektywnie wykorzystał współczesne zaawansowane metody, algorytmy i kody obliczeniowe mechaniki płynów, w tym technikę siatek odkształcalnych i ruchomych, opracował iteracyjny algorytm powiązania modułów aerodynamicznego i strukturalnego oraz oryginalną procedurę interpolacji danych pomiędzy różnymi siatkami podziału geometrycznego. Na szczególne podkreślenie zasługuje przeprowadzenie przez Doktoranta rzetelnej i wszechstronnej analizy wiarygodności proponowanych modeli aerosprężystej analizy wirnika nośnego śmigłowca opartej na weryfikacji i walidacji modeli z wykorzystaniem bogatej bazy teoretycznych i eksperymentalnych danych literaturowych.

III. Uwagi krytyczne i dyskusyjne.

Wnikliwa lektura tego obszernego (liczącego 205 stron) opracowania naukowego nasuwa następujące wątpliwości i uwagi o charakterze dyskusyjnym:

1. W opisie belkowego modelu łopaty (pkt 4.1.1 pracy) przyjęto założenia dotyczące jej odkształcalności w różnych płaszczyznach ruchu nie podając fizykalnego uzasadnienia. W szczególności, czym uzasadnione jest założenie nieskończonej sztywności łopaty w płaszczyźnie obrotów? Jaką rolę odgrywają siły bezwładności w tym przekroju?
2. Doktorant wyprowadza równania różniczkowe cząstkowe na ugięcie, kąt wahań w płaszczyźnie ciągu, kąt skręcenia oraz kąt odchylenia w płaszczyźnie obrotu (str. 53-61) nie powołując się na literaturę. Czy to są oryginalne związki opracowane przez Autora i nie uwzględniane przez innych? Skoro „... większość modeli strukturalnych bazuje na uproszczonych modelach pierwszego rzędu np. na modelu belkowym łopaty (np. CAMRAD II, DYMORE, HOST) ...” (str.43), co nowego jest w proponowanym przez Autora belkowym modelu strukturalnym?

Wyprowadzając równania modelu matematycznego nie można używać nieprecyzyjnych zwrotów takich jak „redukując pewne człony” (str.56, równania (4.3) i (4.4)) czy „przekształcając pewne człony” (str.58, równania (4.8) i (4.9)); należy dokładnie wyjaśnić jakie człony pominięto czy przekształcono i czym jest to uzasadnione. Jest to język nieprecyzyjny, odbiegający od standardu języka inżynierskiego.

3. Nie jest jasne i budzi wątpliwości stwierdzenie Autora w odniesieniu do różnic centralnych (str.62): „W przypadku pochodnych względem czasu ich wykorzystanie było jednak niemożliwe, jeżeli pochodna objęta była operatorem całkowania, gdyż powodowało to wprowadzenie niewiadomych zmiennych w wyrażeniu podcałkowym. W takim wypadku używano pochodnych wstecznych, które bazują w całości na znanych wartościach z poprzednich chwil czasowych.” Wykorzystanie różnic centralnych jest możliwe, spowoduje jedynie konieczność rozwiązania sprzężonego układu równań algebraicznych (odwrócenia niediagonalnej macierzy).
4. Obliczenia aerodynamiki łopaty są znaczącą częścią proponowanych modeli. Niestety Doktorant niewiele miejsca poświęca choćby krótkiemu opisowi metod całkowania równań mechaniki płynów na siatce objętości kontrolnej, zastosowanym modelom turbulencji, użytym

algorytmom obliczeniowym, ograniczając się do zapisu równań zachowania (rozdział 2.3.2) i „żargonu” używanego w komercyjnym kodzie ANSYS Fluent do opisu warunków brzegowych, modeli turbulencji, algorytmów rozwiązania.

Ponadto, w rozprawie rozważany są jedynie przepływy izotermiczne (temperatura nie jest poszukiwaną zmienną polową). Ogólna postać równania zachowania energii całkowitej, wzór (2.12), nie reprezentuje tych przypadków.

Komentarz do wzoru (2.13) na str. 39, jest niepoprawny; dV jest elementarną objętością (nieskończenie małą) a nie objętością pojedynczej komórki, podobnie dA jest elementarną powierzchnią brzegu komórki. Całkowanie jest realizowane po objętości V i brzegu A pojedynczej objętości kontrolnej.

5. W module wyznaczania odkształceń łopaty Doktorant wprowadza kwadratowy model tłumienia w ruchu skrętnym by uwzględnić rzeczywiste tłumienie aerodynamiczne związane z dynamicznym charakterem skręcania i efektem momentu śmigłowego powstającego w wyniku oddziaływania sił odśrodkowych. W realizacji obliczeń wartość współczynnika tłumienia ruchu skrętnego przyjmuje jednak arbitralnie jako zbliżoną „do minimalnej gwarantującej zbieżność procesu symulacji ruchu łopaty”. Jakie jest zatem fizyczne znaczenie tego współczynnika? Jak jego wielkość wpływa na uzyskiwane wyniki modelu symulacyjnego?
6. Jedną z przyczyn rozbieżności pomiędzy wynikami proponowanych modeli VBM+BDS i MDM+BDS jest użycie w pierwszym z nich statycznych charakterystyk profilowych do wyznaczania obciążeń łopaty, co uniemożliwia uwzględnienie zmian sił i momentów aerodynamicznych wynikających z przeciążenia dynamicznego. Dlaczego Doktorant nie podjął próby zastąpienia charakterystyk wyznaczanych z obliczeń pakietem ANSYS Fluent dla dwuwymiarowego opływu profilu charakterystykami eksperymentalnymi? Dla profili wirnika UH-60A przedstawiono je np. w raporcie: W.G. Bousman „*Aerodynamic Characteristics of SC1095 i SC1094 R8 Airfoils*”, NASA, 2003.
7. Bardzo istotną częścią badań przeprowadzonych przez mgr inż. Adama Sieradzkiego jest wnikliwa analiza wiarygodności proponowanych modeli aeroelastyczności wirnika nośnego wiroplata, obejmująca weryfikację i walidację uzyskanych wyników obliczeń. Jest to niewątpliwie dorobek Kandydata, wymagający dużego nakładu pracy w poszukiwaniu wzorców teoretycznych i eksperymentalnych, realizacji obliczeń oraz interpretacji porównawczej wyników, zwłaszcza w modelowaniu tak złożonej aerosprężystości wirnika w jednoczesnym ruchu obrotowym i postępowym. Sposób przeprowadzenia niektórych analiz porównawczych budzi jednak pewne wątpliwości i wymaga komentarzy / dyskusji, a mianowicie:
 - Model VBM+BDS dla wirnika UH60-A poddano wcześniej „kalibracji” wykorzystując wyniki dokładniejszego ale czasochłonnego modelu MDM+BDS (rozdział 7.1.2). W ten sposób wybrano długość końcowego odcinka łopaty i zrezygnowano z zastosowania modelu strat końcowych łopaty. Następnie wyniki tak przystosowanego modułu porównano z obliczeniami z modelu MDM+BDS i publikowanymi danymi eksperymentalnymi. Można zatem w tym przypadku mówić raczej o częściowej weryfikacji i walidacji. Ponadto, rodzi się pytanie na ile model uproszczony jest ogólny, czy takie wstępne obliczenia kosztownym modulem MDM+BDS będą konieczne przy każdej zmianie kształtu łopaty?
 - Jak rozumieć stwierdzenia Doktoranta „W przypadku skoku ogólnego wirnika przyjęto wartość odpowiadającą tej, przy której w dokładnym module obliczeniowym MDM+BDS uzyskano taką samą wartość współczynnika ciągu co w eksperymencie.” (str.127) oraz „Zmodyfikowano natomiast wartość skoku ogólnego wirnika w ten sposób aby uzyskać taką samą wartość współczynnika ciągu co w eksperymencie” (str.151) skoro w tabelach 7.1 i 7.2 porównuje się wyliczone wartości kątów skoku ogólnego i ciągu?

- W porównaniach wyników proponowanych modeli VBM+BDS i MDM+BDS z innymi dostępnymi w literaturze obliczeniami dla przypadku teoretycznego wirnika Ormistona podano jedynie nazwy pakietów z wyników których korzystano (rozdziały 7.1.3 i 7.2.3) bez choćby krótkiego opisu wskazującego najważniejsze różnice w ich modelach w stosunku do weryfikowanych. Utrudnia to ocenę potencjalnych przyczyn rozbieżności.
- Komentarz: pewnym niedostatkiem przedstawionej weryfikacji i walidacji opracowanych modeli symulacyjnych są porównania z wynikami obliczeń o założeniach których brak jest pełnych informacji, bądź z danymi z eksperymentów nie mających charakteru walidacyjnego. Stąd w niektórych przypadkach oceny mogą mieć jedynie charakter jakościowy. Doktorant jest świadom tej sytuacji, gdy poszukując przyczyn rozbieżności pomiędzy danymi eksperymentalnymi i wynikami obliczeń przy użyciu różnych modułów symulacyjnych stwierdza, że „*Nieemożliwe jest zweryfikowanie czy wszystkie przedstawione wyniki odpowiadają konkretnie określonym warunkom obliczeniowym*” oraz że „*...nie można z całkowitą pewnością stwierdzić, że dwie niezależne symulacje przeprowadzone za pomocą dwóch różnych pakietów obliczeniowych dotyczą dokładnie tego samego przypadku*” (str.165). Trudno więc tu mówić o w pełni wiarygodnej weryfikacji i walidacji.

IV. Uwagi dotyczące redakcji pracy.

Wysoko należy ocenić staranną redakcję rozprawy, jej język (niewiele literówek) oraz szatę graficzną (czytelne kolorowe rysunki). W tak obszernej pracy Autor nie ustrzegł się jednak niepotrzebnych powtórzeń, mieszania opisów modeli z warsztatem programisty oraz drobnych niedociągnięć redakcyjnych. Ważniejsze z nich przedstawiono poniżej.

1. Niepełna lista oznaczeń, stosowanie różnych symboli dla tych samych wielkości w tekście i na rysunkach oraz brak definicji niektórych pojęć utrudnia lekturę pracy. Np.: prędkość we wzorach (2.2) i (2.3) oznaczana jako U , tej samej wielkości w równaniach (4.23) i (4.24) i w wykazie oznaczeń przypisuje się symbol V ; litera T używana jest dla oznaczenia ciągu wirnika i tensora naprężeń; w różnych miejscach pracy współczynnik siły nośnej oznaczany jest jako C_L , CL lub CZ , a współczynnik siły oporu jako C_X , CD , bądź C_D ; podobny dualizm oznaczeń stosowany jest w odniesieniu do momentów i innych parametrów wirnika. Nie zdefiniowano też ważnych w przedstawionych analizach wielkości, np. współczynników efektywności aerodynamicznej (*Figure of merit*) i wypełnienia wirnika.
2. Dyskusyjne jest zamieszczenie w głównym tekście rozprawy szczegółowych informacji dotyczących warsztatu programistycznego, takich jak zrzuty z konsoli ANSYS Fluent (rys.5.6, rys.5.9 i rys.5.16), opisy makr (str 83, 87-90) czy wykorzystanych możliwości wizualizacji wyników przy użyciu programów Tecplot i ANSYS Fluent (rozdział 5.3 pracy). Wydaje się, że takie informacje powinny znaleźć się w załączniku do rozprawy.
3. Niepotrzebnie powtarzane są, kolejno dla wirników IS-2, UH-60A i Ormistona, opisy: sposobu uzyskania charakterystyk profilowych (str.109 i 113, str.118 i 120 oraz str.131), topologii zastosowanych siatek dyskretyzacji (str.113, str.120 i 121 oraz str.132); przyjmowanej wartości tłumienia i algorytmu wymiany danych między modułami (str.114, str.122 i str.131). Metodyka dla trzech rozważanych wirników jest taka sama, różnice występują jedynie w zakresach liczb kryterialnych i modelu turbulencji. Wydaje się więc, że logicznym byłoby utworzenie dodatkowego podrozdziału części 6 pracy, umieszczenie w nim pojedynczych, wspólnych dla wszystkich przypadków, opisów wspomnianych algorytmów, wskazanie różnic między analizowanymi wirnikami, przeniesienie z rozdziału 7 wykresów charakterystyk profilowych (rys.7.3 do 7.6; rys.7.11-7.14; rys.7.21-7.22).

4. Drobne błędy redakcyjne:

- Czy używanie „dokładny” w odniesieniu do modelu MDM+BDS ma sens?
- Str.72, wzór (4.25) – te same oznaczenia dla różnych wartości współczynnika siły nośnej - CL po obu stronach równania;
- Str.113 i str.132 – domena prostokątna nie ma trzech wymiarów;
- Str. 130, drugie zdanie pod tytułem podrozdziału 7.1.3: jest „zwalidowany” a powinno być „zweryfikowany”;
- Przedostatni wiersz na str. 154 – odwołanie do błędnego numeru rysunku: jest Rys.7.39 a powinno być Rys. 7.47;
- Akapit pod rys. 7.57: jest MBM+BDS a powinno być MDM+BDS.

V. Wniosek końcowy.

Opiniowana rozprawa doktorska ma duże walory naukowe i aplikacyjne. Jej tematyka została zainspirowana potrzebą ciągłego doskonalenia modeli komputerowej symulacji złożonych zjawisk aeroelastycznych, w celu stworzenia efektywnego i wiarygodnego narzędzia obliczeniowego wspomagającego projektowanie i optymalizację konstrukcji nośnych wirników pod kątem zwiększonych osiągnięć i bezpieczeństwa lotu śmigłowca. Realizując ambitny i obszerny program budowy, weryfikacji i praktycznej walidacji dwóch nowych modeli obliczeniowych Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego rozwiązania trudnego zagadnienia naukowego, szeroką i rzetelną wiedzą z zakresu aerodynamiki obiektów latających, dynamiki ruchu i odkształceń opływającego ciała sprężystego, teorii i metod numerycznych mechaniki płynów, programowania w języku C oraz dużą umiejętnością wykorzystania możliwości obliczeniowych komercyjnego kodu ANSYS Fluent.

W ocenie sylwetki naukowej Kandydata pewien niedosyt pozostawia fakt, że wartościowe wyniki badań Doktoranta nie zostały poddane szerzej ocenie poprzez ich publikacje w periodykach naukowych i/lub referatach konferencyjnych. Natomiast, większość uwag przedstawionych w punkcie III niniejszej opinii ma charakter dyskusyjny, inne dotyczą niewielkich niedociągnięć w redakcji pracy. Nie zmieniają więc one mojej pozytywnej oceny zrealizowanych badań i poziomu opiniowanej pracy.

Dlatego z przekonaniem stwierdzam, że rozprawa dysertacyjna mgr inż. Adama Sieradzkiego spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim przez *Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki* z dnia 14 marca 2003 roku i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

