

dr hab. Jakub Takosoglu, prof. PŚk
Katedra Mechatroniki i Uzbrojenia
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn
Politechnika Świętokrzyska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Jakuba Kocjana

pod tytułem: AEROSTRUKTURALNA OPTYMALIZACJA WIRNIKA NOŚNEGO ŚMIGŁOWCA
Z UWZGLĘDNIENIEM OGRANICZEŃ MASOWYCH I WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH

promotor dr hab. inż. Stanisław Kachel, prof. WAT

promotor pomocniczy ppłk dr inż. Robert Rogulski

1. Podstawa formalna opracowania recenzji.

Podstawą opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Kocjana było pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Mechaniczna” dr. hab. inż. Stanisława Kachela, prof. WAT Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego z dnia 21.11.2025 r.

2. Charakterystyka sylwetki naukowej kandydata.

Pan mgr inż. Jakub Kocjan ukończył studia na Wydziale Mechatroniki i Lotnictwa Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego w 2013 roku uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera. W 2020 roku rozpoczął studia w Szkole Doktorskiej WAT. Jego badania i zainteresowania naukowe koncentrują się na zagadnieniach konstrukcji wiroplątów, ich wytrzymałości, aerodynamiki oraz optymalizacji konstrukcji. W trakcie studiów w Szkole Doktorskiej WAT wygłosił 4 referaty na krajowych konferencjach tematycznych oraz co istotne 4 referaty na konferencjach międzynarodowych. Brał udział w 6 projektach badawczych oraz udział w 4 szkoleniach z zakresu specjalistycznych szkoleń z oprogramowania technicznego. W zakresie pracy dydaktycznej prowadził zajęcia laboratoryjne w języku angielskim z przedmiotu „Basics of graphics engineering”, „Laboratorium wytrzymałości i nauki o materiałach” oraz zajęcia ćwiczeniowe z przedmiotu „Mechanika Techniczna”.

3. Ocena struktury i formy rozprawy, w szczególności opis oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Kocjana pt. „Aerostrukturalna optymalizacja wirnika nośnego śmigłowca z uwzględnieniem ograniczeń masowych i wytrzymałościowych” została opracowana w formie cyklu sześciu powiązanych tematycznie publikacji ([A1]–[A6], lata publikacji 2021–2025). Autoreferat Doktoranta trafnie spaja tezy, metody i wyniki przeprowadzonych prac.

Dysertacja liczy łącznie 182 strony, została podzielona na 10 rozdziałów i zawiera bibliografię obejmującą 182 pozycje literaturowe stanowiące materiał źródłowy do przygotowania dysertacji, załączniki w postaci 6 artykułów naukowych oraz załączniki zawierające kody źródłowe programów Matlab i GriP. Praca zawiera 22 rysunki i 8 tabel z wyłączeniem załączonych artykułów naukowych.

Rozprawę doktorską rozpoczyna krótkie streszczenie dotyczące podjętego do rozwiązania problemu naukowego. Następnie Doktorant w postaci tabelarycznej (Tabela 1) przedstawił wykaz publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej. Cykl obejmuje 6 publikacji. Udział Doktoranta

w powstanie każdego z artykułów został oszacowany na poziomie 75%-80%. Dwie spośród wskazanych publikacji posiadają punktację o wartości 40 pkt., dwie kolejne 70 pkt., jedna 100 pkt. i jedna 140 pkt. (wg wykazu czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego).

W rozdziale drugim i trzecim Autor uzasadnił podjęcie tematyki badawczej w kontekście śmigłowca nowej generacji NGRC (Next Generation Rotorcraft Capability) oraz przedstawił przegląd i analizę współczesnych konstrukcji śmigłowcowych, wskazanie możliwych ścieżek rozwoju konstrukcji śmigłowcowych, określenie innowacyjności prowadzonych badań oraz określenie celu badań w kontekście przyjętej tezy. W rozprawie doktorskiej zaproponowano następującą tezę: *„zastosowanie zalgorytmizowanego procesu optymalizacji wielokryterialnej bazującej na nowoczesnych narzędziach programowych umożliwi zamodelowanie wirnika nośnego śmigłowca o własnościach aerodynamicznych i osiągowych znacznie lepszych w stosunku do konstrukcji projektowanej metodami klasycznymi nie uwzględniającymi algorytmicznej priorytetyzacji zadań”*, którą Doktorant w logiczny i konsekwentny sposób udowodnił w niniejszej rozprawie doktorskiej od analizy stanu wiedzy, poprzez modelowanie CAD i symulacje, analizy CFD, MES i FSI aż do autorskiego algorytmu aerostrukturalnej optymalizacji wielokryterialnej.

Analizując dostępne konstrukcje wirników nośnych określono zbiór parametrów konstrukcyjnych determinujących własności osiągowie śmigłowców. W artykule [A1] przedstawiono wyniki przeprowadzonej analizy konstrukcji nowoczesnych śmigłowców, która obejmowała porównanie prawie siedemdziesięciu konstrukcji wiroplątów pod względem wielkości, a które przeprowadzono zgodnie z wymogami EASA (European Union Aviation Safety Agency) dla dużych i małych śmigłowców. Wprowadzono również podział konstrukcji śmigłowców ze względu na cel misji i zaproponowano następujący podział dla dużych statków powietrznych: transportowe, wielozadaniowe, szturmowe, a dla małych: obserwacyjne, szkoleniowe i użytkowe. Opisano cechy konstrukcyjne statków powietrznych oraz średnie wartości wymiarów płatowców i wirników. Przedstawiono układy wirników śmigłowców pod kątem przeznaczenia operacyjnego. Dane wejściowe na etapie projektowania pozwalają na ocenę obliczeń koncepcyjnych i ocenę ich przydatności w porównaniu do współczesnych konstrukcji, a podane wskaźniki mogą być wykorzystane do obliczenia podstawowych wymiarów wirnika i parametrów osiągow np. jako funkcję maksymalnej masy startowej MTOW. Wyniki prac mogą stanowić podstawę do opracowania modelu wirnika głównego z wykorzystaniem nowoczesnego oprogramowania inżynierskiego i metod optymalizacji wielokryterialnej.

Do wykonania parametrycznego modelu łopaty i w konsekwencji przygotowania modelu numerycznego uwzględniono geometrię i aerodynamikę elementu łopaty. W artykule [A2] scharakteryzowano siły powstające na łopatach w trakcie wykonywania zawisu i opisano w jaki sposób wyznaczać skok łopat wirnika nośnego w celu osiągnięcia wymaganego ciągu. Proces parametryzacji wykonano za pomocą graficznego środowiska programistycznego Siemens NX Open GRIP. Porównano wyniki uzyskane z symulacji CFD i nie stwierdzono większych problemów ze zgodnością. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że środowisko GRIP stanowi szybkie narzędzie do wstępnych analiz i optymalizacji, a połączenie modelowania parametrycznego z analizami CFD i panelowymi stanowi optymalny kompromis szybkości i dokładności.

Dla kompleksowego zbadania warunków pracy wirnika i określenia maksymalnych obciążeń odwzorowano w badaniach symulacjach kilka możliwych faz lotu. W artykule [A3] przedstawiono analizę CFD wirnika głównego śmigłowca w różnych warunkach lotu, wykorzystując wcześniej opracowany parametryczny model łopaty. Badania stanowiły kluczowy element budowy pełnego algorytmu optymalizacji wielokryterialnej i miały na celu ocenę osiągow wirnika dla geometrii generowanej automatycznie. Przeprowadzono analizę CFD dla pojedynczej łopaty oraz pełnego wirnika w warunkach zawisu i lotu postępowego dla różnych prędkości. Model parametryczny łopaty walidowano poprzez porównanie wyników symulacji CFD, wyników analitycznych i danych rzeczywistych uzyskanych w trakcie eksploatacji śmigłowca. Oceniono przydatność metody CFD jako elementu przyszłej optymalizacji aerostrukturalnej. Obliczenia analityczne przeprowadzono

w środowisku Matlab, gdzie wyznaczono kąty, siłę nośną, a także rozkłady prędkości i współczynników aerodynamicznych, które stanowiły dane wejściowe do oprogramowania CFD Ansys Fluent. Dzięki zmodyfikowanemu algorytmowi w środowisku GRIP generowano automatycznie modele łopat o zadanych parametrach (ciężar, profil, promień), co umożliwiło szybkie tworzenie wielu wariantów geometrii łopat. Otrzymane wyniki były zgodne z obliczeniami analitycznymi, jak również z parametrami osiągowymi rzeczywistego śmigłowca przez co wykazano gotowość modelu parametrycznego i konfiguracji środowiska CFD do zastosowania w dalszych etapach badań. Wyniki symulacji i analizy sił powstających na wirniku zastosowano w symulacji FSI.

Doktorant opracowując model strukturalny możliwy do zastosowania w kolejnych etapach projektowania śmigłowca korzystał z wielu środowisk programistycznych poszukując algorytmu wiążącego techniki CAD/CAE/CFD do wyznaczenia rozwiązania optymalnego przy jednoczesnym zapewnieniu akceptowalnych wyników analiz wytrzymałościowych i aerodynamicznych. W artykule [A4] Autor opisuje analizę aerodynamiczno-strukturalną FSI łopaty i wirnika nośnego śmigłowca, opartą na parametrycznym modelu geometrycznym opracowanym we wcześniejszych pracach. Publikacja stanowi uzupełnienie w poszukiwaniu rozwiązania pełnej optymalizacji aerostrukturalnej, gdyż uwzględnia wpływ deformacji łopaty na generowaną siłę nośną. W artykule poruszono również problemy związane z czasem projektowania, czasem tworzenia modeli, samych obliczeń i zużycia pamięci w trakcie symulacji. Wyniki badań uzyskane w poprzednich publikowanych pracach stanowiły dane wejściowe do bieżących prac symulacyjnych. Przeprowadzono dwukierunkowe symulacje FSI łopaty czyli uwzględniające oddziaływanie płyn-struktura przed przygotowaniem analizy FSI łopaty z uwzględnieniem jej ruchu wynikającego z ruchu obrotowego i zmiany kąta nachylenia w funkcji azymutu. Wskazano, że takie podejście może stanowić nową perspektywę dla multidyscyplinarnej optymalizacji projektowania układu wirnika śmigłowca. Wyniki badań przedstawione w [A4] stanowiły podstawę do wykonania modelu strukturalnego do pełnej analizy FSI wirnika nośnego z n -łopatami uwzględniając ruch łopat wirnika nośnego.

Rozwiązanie problemu wielokryterialnej optymalizacji uwzględniającej parametry osiąговые i masowo-wytrzymałościowe wymagało opracowania modelu strukturalnego wirnika. Budowa modelu została poparta analitycznymi obliczeniami obciążeń, które zastosowano do wstępnego oszacowania wymiarów projektowanej struktury. Model generowano za pomocą skryptu w języku GRIP oraz dodatkowo wyznaczono momenty bezwładności profilu, w którym iteracyjnie zmieniano wymiary. Algorytmu generowania modeli do sprzężonej analizy FSI przedstawiono w postaci schematu blokowego (rys. 12). Na podstawie danych wejściowych dotyczących kształtu łopat, zastosowanych materiałów oraz projektowanych warunków lotu wykonano obliczenia analityczne przy wykorzystaniu środowiska MATLAB. Wyznaczono rozkład obciążeń aerodynamicznych w zależności od azymutu i promienia dla obliczonego ciągu wirnika z uwzględnieniem zmian kątów skoku ogólnego i okresowego. Funkcję rozkładu sił aerodynamicznych działających na łopatę wykorzystywano do obliczenia momentów gnących. Dane bezwładnościowe z analizy masowej modelu CAD oraz uwzględniając własności zastosowanego materiału dla poszczególnych elementów konstrukcji wykorzystano do wyznaczenia częstości drgań własnych łopaty. W artykule [A5] przedstawiono częściową optymalizację konstrukcji, obliczenia analityczne i komputerową analizę numeryczną, w tym obliczenia obciążeń i drgań. Parametryzacja wymiarów dźwigara w kolejnych wybranych przekrojach pozwoliła na optymalizację kształtu, przez co uzyskano minimalną masę dźwigara, charakteryzującego się znacznie większą gęstością w porównaniu z pozostałymi elementami łopaty. Analizowano różne modele płaszczyzn łopaty i profile o różnych przekrojach oraz materiały kompozytowe jako elementy wytrzymałościowe. Obliczono obciążenia łopaty i weryfikowano je przy użyciu zadanych warunków materiałowych i proponowanych współczynników bezpieczeństwa. Zaproponowana przez Doktoranta metoda optymalizacji strukturalnej pozwala na istotną poprawę własności aerodynamicznych oraz zmniejszenie masy konstrukcji przy zachowaniu wymogów wytrzymałościowych stanowiąc jeden z kluczowych etapów opracowania końcowego algorytmu optymalizacji i już na tym etapie jest gotowym narzędziem, które można zastosować w procesie projektowania.

Artykuł [A6] stanowi końcowy etap całego procesu badawczego przedstawionego w rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Jakuba Kocjana, w którym zawarto kompletny w pełni zaimplementowany algorytm wielokryterialnej optymalizacji wirnika nośnego śmigłowca integrujący wszystkie wcześniej opracowane elementy czyli, model matematyczny, parametryczne modelowanie CAD, analizy aerodynamiczne CFD, analizy strukturalne MES, sprzężenie FSI oraz iteracyjny proces podejmowania decyzji. Głównym celem pracy było osiągnięcie jak najlepszego kompromisu między osiąganymi aerodynamicznymi oraz ograniczeniami wytrzymałościowymi przy pełnym uwzględnieniu założonych warunków misji.

W celu przedstawienia możliwości optymalizacyjnych procesu Autor poddał optymalizacji cztery kształty o innej masie łopat ale takich samych parametrach wydajnościowych. Kształty różniły się promieniem i wymiarami cięciwy, a w konsekwencji wymiarami wewnętrznymi. Szersza cięciwa to większa masa łopaty ale przy mniejszym promieniu wirnika, natomiast krótsze łopaty można stosować w konstrukcjach o wyższych prędkościach obrotowych wirnika i mniejszej tarczy wirnika, co w konsekwencji zmniejsza przekrój radarowy śmigłowca. Do procesu optymalizacji Doktorant przyjął istniejącą łopatę wirnika śmigłowca PZL W-3 Sokół i parametry tego śmigłowca jako początkowe warunki symulacji. Dane pracy łopaty otrzymano z rejestratora danych lotu FDR (Flight Data Recorder). Przedstawiono wyniki obliczeń analitycznych, oceny wytrzymałości, symulacji FSI oraz kroki między kolejnymi fazami prowadzące do wyników końcowych. Procedura eliminuje nieprawidłowe rozwiązania na każdym etapie aby ostatecznie uzyskać te, które spełniają wymagania. Algorytm multidyscyplinarnej optymalizacji podzielono na 10 zadań. W analizowanym przypadku założono zwiększenie możliwości udźwigu śmigłowca o 200 kg uwzględniając możliwość zwiększenia mocy zespołu napędowego bez konieczności wprowadzania istotnych zmian konstrukcyjnych płatowca. Dane początkowe odpowiadające konfiguracji fabrycznej wirnika nośnego wynosiły:

- promień $R = 7,85$ m,
- cięciwa $c = 0,44$ m,
- masa łopaty $m_b = 65,5$ kg.

W wyniku przeprowadzonych optymalizacji struktury otrzymano wymiary i masy łopaty wirnikowej dla zwiększonego ciągu, które wynoszą w przypadku najmniejszej masy łopaty odpowiednio:

- promień $R = 7,55$ m,
- cięciwa $c = 0,50$ m,
- masa łopaty $m_b = 33,53$ kg.

Autorzy publikacji [A6] podkreślają, że jest to pierwsza publikacja, która w pełny sposób integruje parametryzację, FSI i wielokryterialną optymalizację w projektowaniu wirnika śmigłowca.

Wskazane w rozprawie publikacje [A1]–[A6] są spójne tematycznie i wzajemnie się uzupełniają. Kandydat zadbał o właściwe powiązanie ich w jednolitą narrację naukową poprzez część syntezującą, w której przedstawiono główne wyniki, ich interpretację oraz znaczenie dla rozwoju dyscypliny inżynieria mechaniczna. Forma redakcyjna jest poprawna, a całość spełnia wymogi dotyczące prac zbiorowych, w szczególności w zakresie wskazania wkładu Doktoranta w poszczególnych publikacjach.

4. Ocena wartości naukowej pracy, w tym indywidualnego wkładu kandydata w powstanie pracy zbiorowej, w szczególności czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Indywidualny wkład Doktoranta w cykl publikacji [A1]–[A6] został oszacowany na poziomie 75%–80% w każdej pozycji, przy czym autor jest pierwszym autorem w pracach [A2]–[A6] oraz współautorem w [A1]. Łączna wartość punktowa całego cyklu publikacji wynosi 460 pkt (wg wykazu czasopism naukowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego). W bazie Web of Science

zaindeksowane są 4 publikacje Autora o sumarycznej liczbie cytowań wynoszącej 11, w tym 7 bez autocytowań, H-index wynosi 2. W bazie Scopus zaindeksowanych jest 5 publikacji Autora o sumarycznej liczbie cytowań wynoszącej 19, H-index wynosi 3, co wskazuje na umiarkowaną widoczność badań jednak biorąc pod uwagę pięcioletni okres działalności naukowej jest to wystarczająca liczba. W przyszłości Doktorant powinien zintensyfikować działalność publikacyjną i współpracę z innymi ośrodkami naukowymi, w tym zagranicznymi aby zwiększyć zasięg i znaczenie prowadzonych badań. Autor na prośbę recenzenta uszczegółowił w postaci tabelarycznej deklarowany wkład z udziałem procentowym, który wykonali poszczególni współautorzy wskazanych do oceny cyklu powiązanych tematycznie publikacji (Tabela 1). Udział Doktoranta w powstanie każdego z artykułów dotyczył przede wszystkim głównych i merytorycznych rozwiązań naukowych będących wynikiem prowadzonych badań. Układ cyklu publikacji wskazuje wyraźnie inicjatywę badawczą Autora i jego wiodącą rolę w pracach.

Tabela 1.

Dane bibliograficzne artykułu	Imię i Nazwisko Autora	Udział	Zadania
Kachel S., Rogólski R., Kocjan J. , <i>Review of Modern Helicopter Constructions and an Outline of Rotorcraft Design Parameters. Problems of Mechatronics. Armament, Aviation, Safety Engineering 2021; 12 (3): 27-52</i>	Stanisław Kachel	10 %	konceptcja pracy, nadzór nad badaniami
	Robert Rogólski	15 %	wsparcie w zakresie metodologii badan, sprawdzenie artykulu przed zlozeniem, nadzór nad badaniami
	Jakub Kocjan	75 %	konceptcja pracy, analiza literatury, analiza konstrukcji śmigłowcowych, obliczenia, przygotowanie artykulu, korespondencja z czasopismem, uwzględnienie uwag recenzentów
Kocjan J. , Kachel S., Rogólski R., <i>Helicopter Main Rotor Blade Parametric Design for a Preliminary Aerodynamic Analysis Supported by CFD or Panel Method. MDPI Materials 2022, 15, 4275</i>	Jakub Kocjan	75 %	konceptcja pracy, analiza literatury, przygotowanie parametryzacji, obliczenia CFD, analiza wyników, przygotowanie artykulu, korespondencja z czasopismem, uwzględnienie uwag recenzentów
	Stanisław Kachel	10 %	konceptcja pracy, nadzór nad badaniami
	Robert Rogólski	15 %	wsparcie w zakresie metodologii badan, sprawdzenie artykulu przed zlozeniem, nadzór nad badaniami
Kocjan J. , Kachel S., Rogólski, R., <i>Helicopter main rotor CFD analysis for different flight conditions using parametric blade model as an application for multidisciplinary optimization. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 2023;61(4):793-805</i>	Jakub Kocjan	75 %	konceptcja pracy, analiza literatury, przygotowanie parametryzacji, obliczenia CFD, analiza wyników, przygotowanie artykulu, korespondencja z czasopismem, uwzględnienie uwag recenzentów
	Stanisław Kachel	10 %	konceptcja pracy, nadzór nad badaniami
	Robert Rogólski	15 %	wsparcie w zakresie metodologii badan, sprawdzenie artykulu przed zlozeniem, nadzór nad badaniami
Kocjan J. , Kachel S., Rogólski R., <i>Helicopter main rotor FSI analysis using parametric blade model as an application for multidisciplinary optimization. Journal of Physics: Conf. Ser. 2716(1):012031</i>	Jakub Kocjan	75 %	konceptcja pracy, analiza literatury, przygotowanie parametryzacji, obliczenia FSI, analiza wyników, prezentacja wyników na konferencji, przygotowanie artykulu, korespondencja z czasopismem, uwzględnienie uwag recenzentów
	Stanisław Kachel	10 %	konceptcja pracy, nadzór nad badaniami
	Robert Rogólski	15 %	wsparcie w zakresie metodologii badan, sprawdzenie artykulu przed zlozeniem, nadzór nad badaniami

Kocjan J., Rogólski R., <i>Parametric structure optimization of a main rotor blade as an application for FSI analysis in main rotor optimization process. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 96, 2024.</i>	Jakub Kocjan	80 %	koncepcja pracy, analiza literatury, przygotowanie parametryzacji, obliczenia FSI, analiza wyników, przygotowanie artykułu, korespondencja z czasopismem, uwzględnienie uwag recenzentów
	Robert Rogólski	20 %	wsparcie w zakresie opracowania koncepcji i metodologii badań, sprawdzenie artykułu przed złożeniem, nadzór nad badaniami
Kocjan J., Rogólski R., <i>Aerostructural helicopter main rotor optimization considering mass and strength limitations. International Review of Aerospace Engineering, Vol. 18, no 2, 2025</i>	Jakub Kocjan	80 %	koncepcja pracy, analiza literatury, opracowanie matematycznego modelu optymalizacji, opracowanie algorytmu optymalizacji z wykorzystaniem technik komputerowych, walidacja zaproponowanej metody, analiza wyników, przygotowanie artykułu, korespondencja z czasopismem, uwzględnienie uwag recenzentów
	Robert Rogólski	20 %	wsparcie w zakresie opracowania matematycznego modelu optymalizacji i metodologii badań, sprawdzenie artykułu przed złożeniem, nadzór nad badaniami

Podsumowując cykl publikacji należy stwierdzić, że:

- [A1] – głównym celem pracy był przegląd współczesnych konstrukcji śmigłowców i identyfikacja trendów projektowych wirników, gdzie wykonano analizę statystyczną, porównano współczynniki bezwymiarowe, sklasyfikowano konstrukcje wg misji. W wyniku przeprowadzonych prac ustalono zakres parametrów projektowych oraz wymóg wykonania modelu parametrycznego i optymalizacji.
- [A2] – głównym celem pracy było opracowanie parametrycznego modelu łopaty wirnika i analiza aerodynamiczna przy użyciu metody CFD oraz metody panelowej, gdzie przedstawiono analityczną teorię elementu łopaty i wykorzystano oprogramowanie GRIP, MATLAB, CFD. W wyniku przeprowadzonych prac potwierdzono poprawność modelu (błąd rzędu 2,7–5%).
- [A3] – głównym celem pracy było przeprowadzenie analiz CFD pełnego wirnika w różnych warunkach lotu, gdzie zastosowano parametryczny model z poprzednich badań i wykorzystano dane z rejestratora lotu. W wyniku przeprowadzonych prac potwierdzono poprawność modelu aerodynamicznego, dla wirnika W-3 metoda CFD wygenerowała błąd $\leq 2,7\%$ względem rozwiązań analitycznych, określono wpływ parametrów na ciąg.
- [A4] – głównym celem pracy było wykonanie sprzężonej analizy FSI łopaty i pełnego wirnika, gdzie zastosowano parametryczne modele CAD, CFD, MES, FSI. W wyniku przeprowadzonych prac zweryfikowano synergii aerodynamiki i struktury, uzyskano bezpieczne poziomy naprężeń, potwierdzono konieczność zastosowania FSI.
- [A5] – głównym celem pracy była parametryczna optymalizacja struktury łopaty dla redukcji masy przy zachowaniu wytrzymałości, gdzie wykorzystano oprogramowanie GRIP, MES, CFD/FSI. W wyniku przeprowadzonych prac opracowano 4 warianty łopat (masa 33,5 kg–42,1 kg) osiągając redukcję masy o ok. 40 %–50 %.
- [A6] – głównym celem pracy było opracowanie pełnego algorytmu optymalizacji aerostrukturalnej wirnika z uwzględnieniem ograniczeń masowych i wytrzymałościowych, gdzie zastosowano wielokryterialny model matematyczny. W wyniku przeprowadzonych prac uzyskano ostateczne warianty łopat (masa 33,5 kg–42,1 kg), zwiększono MTOW o 200 kg,

zwiększono udźwig 80 kg–120 kg, osiągnięto pełną zgodność z ograniczeniami strukturalnymi i aerodynamicznymi.

Rozprawa doktorska dotyczyła zagadnień inżynierii mechanicznej, inżynierii lotniczej, inżynierii materiałowej czy informatyki technicznej. Ze względu na to praca ma charakter interdyscyplinarny i jest to mocna strona pracy. Oceniając poziom wiedzy teoretycznej i samodzielności jako osiągnięcie Doktoranta należy przyjąć:

- autorski algorytm optymalizacji aerostrukturalnej wirnika,
- parametryczny model łopaty wirnika,
- matematyczny model optymalizacji,
- model aerodynamiczny.

Autor swobodnie operuje narzędziami i technikami badawczymi takimi jak: CFD (Computational Fluid Dynamics), MES/FEM (Finite Element Method), FSI (Fluid-Structure Interaction), parametryczne modelowanie CAD (Computer Aided Design), modelowanie analityczne, optymalizacja wielokryterialna, analiza danych rzeczywistych FRD (Flight Recorder Data), projektowanie eksperymentów numerycznych DOE (Design of Experiments) dzięki, którym przeprowadzono szereg badań symulacyjnych, modelowania komputerowego, optymalizacji i analiz. Do rozwiązania problemów badawczych Doktorant wykorzystał kilka narzędzi informatycznych: Siemens NX (GRIP), MATLAB, ANSYS Fluent, Siemens STAR-CCM+, Flightstream oraz własny kod optymalizacyjny.

Zakres przeprowadzonych prac w mojej ocenie potwierdza opanowanie wiedzy teoretycznej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz zdolność do samodzielnego prowadzenia badań. Dodatkowym potwierdzeniem aktywności naukowej i dojrzałości badawczej Kandydata jest szereg referatów na konferencjach międzynarodowych i krajowych, udział w grantach uczelnianych, realizacja prac z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania naukowo-technicznego oraz działalność dydaktyczna i szkolenia specjalistyczne.

5. Zastrzeżenia i uwagi krytyczne.

Walidację opracowanego algorytmu wykonano tylko w jednym studium przypadku weryfikując metodę numerycznie na przykładzie wirnika śmigłowca PZL W-3 Sokół bez eksperymentalnego potwierdzenia (np. prób tunelowych lub testów naziemnych), co Autor sam uczciwie przyznaje. Nie jest to odosobniony przypadek na etapie prac doktorskich, lecz dla pełnej generalizacji wyników wskazana byłaby walidacja eksperymentalna lub próba przeniesienia metody na inną platformę wirnikową. Algorytm w głównej mierze dotyczy łopaty i modelu wirnika. Pozostałe elementy takie jak głowica wirnika, tarcza sterująca i zagadnienia pełnej aerostatyki są wskazane jako kierunek dalszych badań Autora. Jednak uzupełnienie modelu o te elementy wzmocniłoby komplementarność metody np. w zastosowaniach przemysłowych. Czy w chwili obecnej jest możliwość zwalidowania metody na innym obiekcie? Czy możliwe są badania eksperymentalne w tym zakresie w postaci naziemnych testów statycznych łopat lub ich segmentów albo w oparciu o małoskalowe prototypy?

Biorąc pod uwagę koszt obliczeniowy i szczegóły metod numerycznych metoda ta może być ograniczona w zastosowaniach przemysłowych. Pełna analiza FSI wirnika „konsumowała” ok. 90% czasu obliczeniowego (48 godz.). W przyszłości warto rozważyć modele zastępcze (Surrogate Models/Meta-Models), analizy wrażliwości i niepewności (Sensitivity Analysis Uncertainty Analysis), automatyczną adaptację siatki AMR (Automatic Mesh Refinement) i badania niezależności od siatki (Mesh Independence Study). Czy Doktorant zamierza zaproponować „szybszą” metodę optymalizacji? Jeśli tak to jakimi metodami i narzędziami?

W pracy zwrócono uwagę na różnice dokładności metod aerodynamicznych i wykazano, że metoda panelowa jest użyteczna do wstępnej oceny ale dla wirnika wielołopatowego może generować większe odchylenia dlatego wybrano metodę CFD/FSI na końcowym etapie walidacji. W pracy Doktorant mógł

szerzej omówić granice stosowalności obu podejść i praktyczne kryteria przełączania w pętli optymalizacyjnej. Czy może Pan dokładniej wyjaśnić to zagadnienie?

Doktorant na potrzeby rozwiązania problemu optymalizacyjnego zaproponował i wykonał zaawansowany cykl obliczeń, oparty o narzędzia i techniki badawcze, które wymieniłem w rozdziale 4 niniejszej recenzji. Czy jest możliwość przeniesienia kompletnego algorytmu do wytworzenia dedykowanego narzędzia (GUI/API) umożliwiającego projektantom bezpośrednie korzystanie z procedury np. wybór profilu misji, automatyczne generowanie wariantów, integracja z systemami CAD w przedsiębiorstwie itp.? W ten sposób powstałby gotowy produkt dla zastosowania przemysłowego.

Obecny zaproponowany autorski model uwzględnia klasyczne kompozyty stosowane w lotnictwie. Czy Autor zamierza rozwijać metodę o badania nad innymi materiałami np. kompozytami hybrydowymi, strukturami gradientowymi czy materiałami drukowanymi?

Doktorant nie ustrzegł się kilku błędów ogólnych i szczegółowych, które przytaczam poniżej:

Str. 1 – Promotor pomocniczy: płk dr. inż. Robert Rogólski – dr powinno być bez kropki.

Str. 8 – Tabela 1. opis artykułu [A5] – Aircraft Engineering and Aerospace Technology – literówka w wyrazie Engineering.

Str. 13 – równanie opisujące współczynnik wypełnienia podano dla stałej cięciwy. Powinno być podane równanie dla zmiennej cięciwy $c(r)$: $\sigma = \frac{z}{\pi R^2} \int_0^R c(r) dr$, którą charakteryzują się nowoczesne śmigłowce i następnie podane równanie przedstawić w wersji uproszczonej.

Str. 20 – błędnie zapisano równanie funkcjonału (prawdopodobnie podczas pracy z edytorem równań), powinno być: $\tilde{F}(c, R, h, d) = w_1 \frac{1}{\tilde{T}(\sigma(c, R))} + w_2 \tilde{m}(h, d)$.

Str. 24, 31, 32, 45 – zamiast „wyliczenia” powinno być obliczenia.

Str. 19 – termin „wypełniacz ulowy”, chyba lepiej stosować wypełnienie typu honeycomb.

Str. 28, 29, 39 – Tabela 2, Tabela 3, Tabela 5 – zapis liczb dziesiętnych z kropką.

6. Konkluzja i wnioski końcowe.

Rozprawa mgr. inż. Jakuba Kocjana jest dojrzałą, spójną i wartościową pracą naukową przygotowaną w formie cyklu publikacji. Autor zaproponował i zwalidował oryginalną metodykę wielokryterialnej optymalizacji aerostrukturalnej wirnika głównego śmigłowca stanowiącą zintegrowaną procedurę badawczą. Wynikiem przeprowadzonych prac są mierzalne korzyści osiągnięte i masowe, potwierdzone analizami numerycznymi i walidacją etapową. Indywidualny wkład Doktoranta jest wysoki i dotyczy kluczowych komponentów przedstawionego rozwiązania. Znajomość wiedzy teoretycznej i praktycznej potwierdza zdolność Doktoranta do samodzielnego prowadzenia badań.

Uważam, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Jakuba Kocjana spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w rozumieniu obowiązującej Ustawy w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i wnoszę o dopuszczenie autora do publicznej obrony.