



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

Warszawa 2.02.2026

Prof. dr hab. inż. Artur Rusowicz

Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

Ul. Nowowiejska 24

00-665 Warszawa

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jakuba Kocjana pt.:

„Aerostrukturalna optymalizacja wirnika nośnego śmigłowca z uwzględnieniem ograniczeń masowych i wytrzymałościowych

Recenzję wykonano na podstawie Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego nr 70/RDN IM/2025 z dnia 19 listopada 2025 roku.

Rozprawa doktorska powstała i została zredagowana pod kierunkiem dr. hab. inż. Stanisława Kachela, prof. WAT oraz ppłk. dr. inż. Roberta Rogólskiego, jako promotora pomocniczego.

1. Przedmiot rozprawy

Rozprawę doktorską stanowi cykl 6 monotematycznych publikacji opatrzonych szeroko opracowanym wstępem wprowadzającym w podejmowane zagadnienia. Przedmiotem przedłożonej do oceny rozprawy doktorskiej było przeprowadzenie badań do określenia modelu matematycznego optymalizacji wielokryterialnej wirnika nośnego. W pracy przedstawiono proces formułowania modelu matematycznego optymalizacji. Zaproponowano postać funkcjonału optymalizacji wielokryterialnej, zmienne decyzyjne, ograniczenia oraz parametry projektowe traktowane jako niezmiennie. W dalszej fazie badań zaprezentowano metodę wyznaczania ekstremalnych wartości funkcjonału poprzez użycie metody systematycznego



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

przeszukiwania z wykorzystaniem technik komputerowych. Podstawą do analizy numerycznej zagadnienia jest przygotowanie parametrycznego modelu pojedynczej łopaty wirnika nośnego. Parametryzacja geometrii łopaty jest realizowana z wykorzystaniem środowiskowego języka programowania GRIP (*Graphics Interactive Programming*). Równolegle z wykorzystaniem metod komputerowych wykonywane są obliczenia analityczne, które pozwalają na wyliczenie trymowania łopat wirnika nośnego tj. określenia funkcji zmiany kątów skoku ogólnego i okresowego w zależności od azymutalnego położenia łopat. Otrzymane wyniki służą typowaniu pożądanych parametrów symulacji, jak również wygenerowaniu modeli parametrycznych wirnika nośnego wraz z odpowiednimi domenami płynowymi oraz ich strukturą wewnętrzną. Następnie prace te stanowiły punkt wyjścia dla analizy zagadnienia stacjonarnego dla jednej łopaty wirnika z opływem symulowanym dla warunków ruchu obrotowego i dalej n-łopatowego wirnika. Otrzymane wyniki naprężeń z symulacji CFD stanowiły punkt wyjścia do analitycznych i numerycznych analiz wytrzymałościowych. W dalszej kolejności odkształcenia spowodowane obciążeniami były zwrotnie przekazywane do modelu CFD i uwzględniane w modyfikacji siatki obliczeniowej. Proces realizowany był iteracyjnie w określonych krokach czasowych. Odwzorowano w ten sposób wpływ odkształceń łopat wirnika na generowaną siłę nośną.

Biorąc pod uwagę zawarte w rozprawie rezultaty badań proponowanych rozwiązań łopat wirnika śmigłowca, uzyskane wyniki analiz teoretycznych oraz obliczeniowych – stwierdzam, że odpowiadają one sformułowanemu celowi rozprawy. Zakres rzeczowy rozprawy oraz zaproponowany jej zakres korespondują ze sformułowaną tezą rozprawy i pozwalają na uzyskanie rezultatów umożliwiających jej udowodnienie.

2. Struktura redakcyjna pracy

Rozprawę doktorską zredagowano na 182 stronach w postaci streszczenia pracy w języku polskim i angielskim (str. 4-7). Następnie na stronie 8 zamieszczono wykaz 6 publikacji stanowiących monotematyczny cykl:



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

1. Kachel S., Rogólski R., **Kocjan J.**, *Review of Modern Helicopter Constructions and an Outline of Rotorcraft Design Parameters*. Problems of Mechatronics. Armament, Aviation, Safety Engineering 2021; 12 (3): 27-52 – udział doktoranta 75%;
2. **Kocjan J.**, Kachel S., Rogólski R., *Helicopter Main Rotor Blade Parametric Design for a Preliminary Aerodynamic Analysis Supported by CFD or Panel Method*. MDPI Materials 2022, 15, 4275 – udział doktoranta 75%; Q1
3. **Kocjan J.**, Kachel S., Rogólski, R., *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 – udział doktoranta 75%; Q3
4. **Kocjan J.**, Kachel S., Rogólski R., *Helicopter main rotor FSI analysis using parametric blade model as an application for multidisciplinary optimization*. Journal of Physics: Conf. Ser. 2716(1):012031 - udział doktoranta 75%; Q3
5. **Kocjan J.**, Rogólski R., *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 - udział doktoranta 80%; Q2
6. **Kocjan J.**, Rogólski, R. *Aerostructural helicopter main rotor optimization considering mass and strength limitations*. International Review of Aerospace Engineering, Vol. 18, no 2, 2025. - udział doktoranta 80%. Q2

W dalszej kolejności zamieszczono opis wyjaśniający, dotyczący cyklu publikacji (str.9-46). Dalsze strony dotyczyły przybliżenia sylwetki naukowej Doktoranta, w postaci zestawienia konferencji w których brał udział, w liczbie 8 oraz 2 publikacje nie uwzględnionych w cyklu publikacji stanowiących rozprawę doktorską (str.47), Dodatkowo Doktorant wymienił projekty badawcze w których uczestniczył (w liczbie 6) oraz odbyte kursy, szkolenia i praktykę zawodową. Na stronach 49-58 zamieścił Bibliografię zawierającą 182 pozycje.

Następną część pracy stanowią załączniki. W załącznikach grupy A znajduje się 6 pełnych publikacji zgłoszonych do rozprawy doktorskiej (str.59-72). Załącznik B (str.73-182) zawiera kody źródłowe z MATLABA: trzymowanie wirnika nośnego, wyznaczenie momentu gnącego łopate oraz z GRIP - parametryczny model jednołopatowej i n-łopatowej symulacja CFD, parametryczny model strukturalny.



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

W pierwszej publikacji A1 (zaprezentowanej na stronach 61-86) dokonano przeglądu konstrukcji współczesnych śmigłowców. Porównano prawie siedemdziesiąt konstrukcji wiroplątów podzielonych ze względu na rozmiar: zgodnie z wymaganiami EASA – duży i mały śmigłowiec. W ramach rozmiaru statki powietrzne zostały podzielone ze względu na cel misji. Proponowany podział dla dużych śmigłowców to: transportowe, wielozadaniowe i szturmowe, natomiast dla małych: obserwacyjne, szkoleniowe, użytkowe. Wyszczególniono najważniejsze cechy konstrukcyjne wiroplata. W pracy zaprezentowano średnie wartości wymiarów płatowców i wirników. Przedstawiono również układ wirników śmigłowca pod kątem przeznaczenia operacyjnego. Finalnie opisano parametry projektowe przydatne w projektowaniu wstępnym. Parametry opisano za pomocą wzorów matematycznych oraz dla każdego z nich zaprezentowano na wykresie zebrane dane statystyczne. W artykule pokazano zależność parametrów w funkcji maksymalnej masy startowej statków powietrznych. Wyznaczono trendy w celu dostarczenia narzędzi do oceny projektowanych śmigłowców. Przegląd literatury oparto na 28 pozycjach, aktualnych i dobrze dobranych do tematyki publikacji.

W drugiej publikacji A2 (zaprezentowanej na stronach 87 – 102) zawarto wstępną część programu badawczego, którego celem jest znalezienie nowych metod i rozwiązań projektowych w zakresie multidyscyplinarnej optymalizacji łopaty wirnika nośnego śmigłowca. W pracy wykorzystano dobrze przebadane łopaty wirnika śmigłowca W-3 Sokół. Zadaniem było opracowanie parametrycznego modelu geometrycznego wirnika nośnego o pojedynczej łopacie, nadającego się do różnych metod numerycznego modelowania aerodynamicznego. Opisano ogólne założenia analityczne do parametrycznego projektowania wirnika nośnego. Przedstawiono metodę parametrycznego projektowania łopaty wirnika opartą na programowaniu graficznym Open GRIP. Następnie parametryczny model łopaty został wykorzystany do modeli aerodynamicznych opracowanych niezależnie dla metody panelowej i zaawansowanego solvera CFD. Otrzymane wyniki symulacji CFD i analizy panelowej dla aerodynamiki wirnika porównano i oceniono za pomocą obliczeń analitycznych. Obliczenia i symulacje dla pojedynczej łopaty i pełnego wirnika przeprowadzono dla różnych mas śmigłowca i kątów nastawienia wirnika. Wyniki różnych środowisk



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

komputerowej analizy aerodynamicznej porównano pod kątem możliwości ich zastosowania w pętli optymalizacyjnej.

Niniejsze badania przedstawiają nowe podejście do modelowania napływu na łopatę wirnika. Stacjonarna łopata złożona z modelem analitycznym przepływu powietrza daje poprawne wyniki i zużywa mniej mocy obliczeniowej oraz czasu. Dlatego możliwe jest zastosowanie tego typu symulacji we wstępnym projektowaniu wirnika głównego, co jest użyteczne w badaniach optymalizacyjnych. Połączenie stacjonarnej łopaty z modelowaniem parametrycznym stanowi pierwszy etap optymalizacji, mający na celu ocenę konstrukcji i udoskonalenie jej wstępnego kształtu. Metoda ta dostarcza początkowy kształt w krótkim czasie. Dlatego nawet gdy obliczenia są łączone z analizą mechaniczną (FSI), czas analizy jest skrócony. Podsumowując, wyniki tej pracy, badania mogą posłużyć jako podstawa do opracowania aerostrukturalnego modelu wirnika głównego (łącznie z właściwościami aerodynamicznymi i strukturą elementów skończonych) do dalszej analizy wytrzymałościowej, w której można uwzględnić zarówno obciążenia aerodynamiczne, jak i masowe.

Stan wiedzy Doktorant wykonał na podstawie 30 publikacji, odpowiednich tematycznie do poruszanych zagadnień.

Trzecia publikacja A3 (zaprezentowana na stronach 103 – 119) stanowi rozwinięcie modelu drugiej publikacji. Do wcześniejszego programu generującego model parametryczny zostaje dodana możliwość wytworzenia wirnika wraz z geometrią przygotowaną pod kątem analizy lotu postępowego. Rozwinięty model CAD jest zbudowany w następujący sposób: główna objętość płynowa, przeznaczona na symulację otaczającego powietrza zamodelowana została w postaci prostopadłościanu. Wewnątrz lokalna objętość wirnika, wykorzystywana do zagęszczenia siatki obliczeniowej, modelowana jest w postaci cylindra. Jednocześnie każda łopata posiada własną objętość cylindryczną, co umożliwia jej swobodny obrót wokół własnej osi. Takie podejście pozwala na precyzyjne odwzorowanie dynamiki ruchu wirnika i dokładniejsze modelowanie zjawisk aerodynamicznych zachodzących w jego otoczeniu.



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

Domeny generowane są proporcjonalnie do zadanych wymiarów wirnika. Uwzględniają one uwarunkowania programów do numerycznej analizy dynamiki płynów pozwalając w pierwszej kolejności na wygenerowanie jakościowo dobrej siatki obliczeniowej. Prawidłowo wykonana siatka pozwala wykluczyć nieprawidłowości wyników spowodowane niewłaściwym doбором wymiarów domeny płynowej.

Bibliografię stanowi 90 publikacji.

W czwartej publikacji (zaprezentowanej na stronach 120-127) artykuł przedstawia kolejny etap programu badawczego, którego celem jest zbadanie nowych metod projektowania wirnika głównego z wykorzystaniem nowoczesnych technik w ramach pętli optymalizacyjnej. W tym kroku przeprowadzono dwukierunkowe symulacje FSI (Fluid-Structure Interaction) dla pojedynczej łopaty, jako wstępny etap przed przygotowaniem analizy FSI dla łopaty z uwzględnieniem jej ruchu wynikającego z obrotu oraz zmiany skoku w funkcji azymutu.

Wyniki potwierdzają, że parametryczny model łopaty jest szybkim i efektywnym rozwiązaniem do przygotowywania symulacji FSI. Modele CFD (Computational Fluid Dynamics) i MES (Metoda Elementów Skończonych) zostały wygenerowane w zaledwie kilka minut przy użyciu przygotowanego kodu. Kompatybilność między domeną CFD a modelem MES została zapewniona poprzez wycięcie dokładnego kształtu łopaty z domeny. Nie wystąpiły problemy z generacją siatki, a modele były zgodne z oprogramowaniem. Wyniki analizy CFD są zgodne z oczekiwaniami analitycznymi oraz wcześniejszymi, samodzielnymi symulacjami CFD. Model matematyczny napływu dla symulacji pojedynczej łopaty dostarcza dokładnych wyników.

Analiza MES, jako część symulacji FSI, wykazała wpływ obciążenia ciśnieniowego na łopatę. Analizowano naprężenia w elementach nośnych oraz przemieszczenie łopaty, aby zidentyfikować słabe punkty konstrukcji i wprowadzić niezbędne poprawki projektowe. Korekty te wdrożono przy użyciu dedykowanego oprogramowania lub kodu, aby ułatwić działanie pętli optymalizacyjnej.

Niniejsze badanie prezentuje nowe podejście do analizy aerostrukturalnej łopat wirnika głównego z zastosowaniem metody parametrycznej. Zastosowanie geometrii



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

parametrycznej znacząco skraca czas projektowania. Wyniki te stanowią podstawę do przygotowania modelu strukturalnego do pełnej analizy FSI wirnika głównego z n-łopatami, obejmującej ruch łopat wirnika głównego.

Kolejną zaletą tej procedury jest elastyczność, jaką oferuje w zakresie zmiany zewnętrznego kształtu łopaty lub kształtu wewnętrznej struktury nośnej. Jest to kluczowe dla opracowania pętli optymalizacyjnej, która może zidentyfikować najlepsze właściwości aerodynamiczne i elementy wytrzymałościowe spełniające wymagania eksploatacyjne.

Bibliografia liczy 21 pozycji.

W piątej publikacji A5 (zaprezentowanej na stronach 128-142) przedstawiono metodę wstępnej optymalizacji struktury łopaty wirnika głównego z wykorzystaniem modelowania parametrycznego. Jest to kolejny etap badań nad optymalizacją wirnika głównego, po przygotowaniu modelu parametrycznego do analizy CFD kształtu zewnętrznego. Przedstawiono równania obciążeń sztywnych łopaty oraz, w konsekwencji, naprężenia elementów wytrzymałościowych. Modelowanie parametryczne łopat przeprowadzono przy użyciu języka programowania Graphic Integrated Programming. Wykazano, że metoda projektowania parametrycznego może być stosowana do różnych modeli kształtu łopat i różnych profili aerodynamicznych. Struktura łopaty jest generowana automatycznie po wprowadzeniu parametrów przez Doktoranta. Wbudowane w kod systemy analityczne zapewniają szybką analizę bezwładności wygenerowanej geometrii, która stanowi podstawę do dalszej optymalizacji. Program oblicza obciążenia łopat i weryfikuje je pod kątem podanych warunków materiałowych i proponowanych współczynników bezpieczeństwa. W analizie zaproponowano materiały kompozytowe dla elementów wytrzymałościowych.

Bibliografia zawiera 43 pozycje.

W szóstej publikacji A6 (zaprezentowanej na stronach 143-153) przedstawiono ostatni etap badań mających na celu optymalizację wirnika głównego w celu osiągnięcia najlepszej wydajności zgodnie z profilami misji, przy uwzględnieniu ograniczeń wytrzymałości konstrukcji i redukcji masy. Cel optymalizacji wielokryterialnej opisano za pomocą funkcji matematycznych. Zaproponowano



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

funkcję optymalizacyjną oraz metodę znajdowania optymalnego rozwiązania. Procedura optymalizacji obejmuje połączenie metod komputerowych, obliczeń i symulacji interakcji płyn-struktura (FSI). Niestabilne siły aerodynamiczne, na które wpływ ma odkształcenie konstrukcji, są symulowane dla różnych warunków lotu w oparciu o dane uzyskane z rejestratorów lotu. Model CAD i obliczenia są w pełni sparametryzowane, co pozwala na szybkie dostosowanie wymiarów wejściowych. Pętla optymalizacji jest przedstawiona jako algorytm, demonstrujący wdrożenie wcześniejszych etapów badań. Artykuł kończy się potencjalnymi zastosowaniami algorytmu w istniejących lub nowych projektach konstrukcyjnych. Badania wprowadzają nowatorskie rozwiązanie w zakresie projektowania łopat wirnika głównego, zapewniające możliwość szybkiej oceny różnych konstrukcji zgodnie z wymaganiami misji. Proces kończy się wyborem jednego bądź kilku rozwiązań spełniających funkcjonalny cel. Zoptymalizowane modele mogą być zastosowane w kolejnych iteracjach projektowych

Bibliografia zawiera 43 pozycje.

Reasumując, przedstawiony cykl sześciu publikacji stanowi merytorycznie zamkniętą całość wzbogaconą o umowne „Wprowadzenie”, które zawiera dodatkowe, ważne informacje dotyczące rozprawy.

3. Uwagi krytyczne redakcyjne i dyskusyjne do pracy.

Praca jest bardzo starannie zredagowana, stosowana jest poprawna nomenklatura naukowa oraz techniczna. Publikacje przechodziły wcześniejsze procesy recenzji i uwag edytorskich, więc niewiele można skierować do nich uwag krytycznych. W pracy zamieszczono wiele informacji pozwalających na szczegółowe przeanalizowanie materiału badawczego. Podane uwagi krytyczne mają charakter dyskusyjny bądź porządkowy i powinny być traktowane raczej jako pomoc w zakresie wykorzystania uzyskanego materiału w dalszej pracy nad bardzo złożonymi zagadnieniami mechanicznymi w łopatach wirników śmigłowców. Uwagi te nie pomniejszają wartości merytorycznej opiniowanej rozprawy.



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

Uwaga dyskusyjna dotyczy skromnego opisu modelu płynu w symulacjach CFD, jakie zostały przyjęte założenia. Druga kwestia dotyczy doboru liczby węzłów i generacji siatek obliczeniowych. Jaką metodą sprawdzano poprawność doboru siatki do symulacji numerycznych.

4. Podsumowanie

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiona do recenzji praca doktorska charakteryzuje się pod względem merytorycznym znaczną zawartością prowadzonych badań. Cykl publikacji prowadzi, krok po kroku, do uzyskania założonego celu pracy. Publikacje Doktoranta są zrealizowane w wąskim gronie autorów, czyli doktorant, promotor i promotor pomocniczy. W każdej publikacji Doktorant ma udział znaczący, większościowy udział w pracy na poziomie 75% i 80%. Ponadto w pięciu publikacjach jest autorem znajdującym się na pierwszym miejscu, wśród współautorów i autorem korespondencyjnym. Publikacje są opublikowane w znaczących czasopismach głównie z kwartyła drugiego i trzeciego wg. baz Scopus, stąd też, jak na młodego badacza, niezłe wskaźniki bibliometryczne wg, Scopus h-index 3 i 6 dokumentów w bazie oraz wg, WoS Core h-index 2 i 4 dokumenty.

Oceniając pracę pod względem redakcyjnym, stwierdzam jej bardzo wysoki poziom. Zastosowany język i terminologia mają w zupełności charakter techniczny, wymagany w tego typu opracowaniach.

5. Ocena pracy i wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest poważną, wnoszącą wkład poznawczy oraz metodyczny pracą naukową. Doktorant wykazał się umiejętnością formułowania problemów badawczych i rozwiązywania ich przy użyciu metod właściwych dla mechaniki, mechaniki płynów i wytrzymałości materiałów. W moim przekonaniu przedstawiona do recenzji rozprawa jednoznacznie spełnia zwyczajowe ramy stawiane pracom doktorskim, zarówno pod względem zakresu rzeczowego, jak



Wydział Mechaniczny Energetyki i Lotnictwa

Politechnika Warszawska

poziomu oryginalności osiągnięć technicznych, konstrukcyjnych oraz metodycznych. Co więcej – istotnym walorem pracy są aspekty poznawcze dotyczące zagadnień naukowych o wciąż otwartym charakterze. Należy podkreślić, że Doktorant realizując prace badawcze musiał zmierzyć się z koniecznością zdobycia wiedzy o charakterze interdyscyplinarnym, a rozwiązywanie wielu problemów natury konstrukcyjnej wymagało bardzo dużego poziomu kreatywności Doktoranta. Uwagę zwraca także bardzo dobrze opanowany, dojrzały warsztat pracy naukowej, czego efektem jest wiele krytycznych analiz zawartych w rozprawie. Zaprezentowana w rozprawie analiza stanowi rozwiązanie zadania naukowego i spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zaś oryginalność osiągnięć badawczych Doktoranta skłania mnie do wniosku o jej wyróżnienie. Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że:

1. Rozprawa doktorska mgr. inż. Jakuba Kocjana spełnia wymagania Art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. 2018 z. 1668 z późn. zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.
2. Zakres rozważań rozprawy kwalifikuje ją do dyscypliny naukowej: Inżynieria Mechaniczna.
3. Wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.

A. Prowa