

dr hab. inż. Stanisław KACHEL, prof. WAT
Instytut Techniki Lotniczej
Wydział Mechatroniki i Lotnictwa
Wojskowa Akademia Techniczna

Warszawa, dn. 29.07.2020 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Witolda KLIMCZYKA p.t.: „Aero-Structural Aircraft
Wing Design and Optimization with Stability Constraints”

1. Podstawa opracowania

Decyzja Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 3 czerwca 2020 r.

2. Zakres pracy

Podjęty przez Doktoranta problem projektowania i optymalizacji struktury nośnej samolotu z uwzględnieniem ograniczeń wpływających na jego własności lotne, jest zagadnieniem złożonym z punktu widzenia naukowo badawczego i niezwykle ważnym ze względów użytkowych. Wyniki badań przedstawione w rozprawie, mogą być wykorzystane przez konstruktorów, ekspertów jak i ludzi nauki, którzy próbują w swoich rozważaniach opracować najlepszą koncepcję układu aerodynamicznego samolotu - czyli optymalną dla przyjętych i rozpatrywanych kryteriów.

Przedstawione w rozprawie badania obejmują gruntowną analizę procesu modelowania struktury skrzydła z uwzględnieniem kluczowych zagadnień modelowania aerodynamicznych układów nośnych. W procesie tym Autor wykorzystuje nie tylko komercyjne oprogramowanie ale również własne opracowane modele do wykonania analiz, a które pośrednio realizują proces optymalizacji struktury skrzydła samolotu na potrzeby modelowania nowych brył aerodynamicznych statków powietrznych.

Praca liczy 143 strony i składa się z następujących elementów: streszczenia, spisu rysunków, spisu tabel, wykazu ważniejszych skrótów i oznaczeń, sześciu rozdziałów, wniosków, oraz bibliografii, która stanowi integralną część całości, przedstawionej do recenzji rozprawy.

Przedstawiona do recenzji praca jest skoncentrowana na zagadnieniach związanych z badaniem wpływu parametrów geometrycznych określających własności aerodynamiczne



modelowanych zespołów nośnych samolotu i ich wpływ na uzyskanie najlepszych walorów wynikających z wymagań stawianych przez mechanikę lotu. Praca obejmuje multidyscyplinarne podejście do procesu poszukiwania optymalnego rozwiązania skierowanego na udowodnienie postawionej tezy pracy to znaczy, że: „użycie nowoczesnych systemów projektowania i ich efektywnych algorytmów optymalizacji pozwoli tworzyć geometrię skrzydła samolotu z własnościami aerodynamicznymi lepszymi niż projektowane skrzydło klasycznymi (starszymi) metodami”.

Rozdział pierwszy zatytułowany *Introduction* podzielono na sześć podrozdziałów w których przedstawiono podłoże podjętych dociekań naukowych na tle pojawiających się problemów projektowania konstrukcji lotniczych. W pracy Autor zwrócił uwagę na istotę naukowego problemu, który należy rozwiązać w procesie projektowania samolotów koncentrując się na głównym zespole struktury tj. skrzydło samolotu, i tu Autor rozprawy dokonał stosownego podziału rozpatrywanych problemów odnosząc się do literatury, a które należy wzbogacić o procedury multidyscyplinarnej optymalizacji poszukiwania rozwiązania spełniającego wymagane kryteria. W kolejnych zdaniach zwięzłej notatki odwołano się pośrednio do idei generującej rozwój procesu projektowania samolotów z wykorzystaniem komputerowego systemu wspomagania procesu projektowania (CAD). Przeprowadzone w rozprawie rozważania dotyczące literaturowych problemów jasno wskazują trudne etapy pojawiające się podczas projektowania struktury samolotu. Zamieszczone podrozdziały w rozdziale pierwszym podkreślają wagę problemu optymalizacji na etapie rozwoju ogólnie pojętego projektu. Należy stwierdzić, że na tle przeprowadzonych rozważań w tym rozdziale przygotowano grunt pod wyłaniającą się tezę rozprawy, która brzmi: „*Zastosowanie nowoczesnych metod modelowania i skutecznych algorytmów optymalizacji, pozwala na generowanie geometrii skrzydła samolotu o własnościach lepszych od klasycznie zaprojektowanego*”.

W rozdziale drugim pt. *Review of Numerical Optimization* Autor w jasny sposób przedstawia podstawowe idee matematycznego podejścia do procesu optymalizacji w zagadnieniach poszukiwania rozwiązania spełniającego narzucone kryteria w ustalonych ograniczeniach dla zmiennych optymalizacji mających decydujący wpływ na rozwiązanie zadania. W rozdziale tym został przedstawiony ogólny schemat formułowania problemu optymalizacji oraz Autor odniósł się bezpośrednio poprzez opracowane algorytmy do systemów wspomagających proces zdążający do otrzymania optymalnego rozwiązania, co stanowi wartość dodaną w rozpatrywanym obszarze naukowych dociekań. Istotnym elementem analizowanego rozdziału



jest przedstawienie podejścia do tworzenia modeli zastępczych oraz podanie ich matematycznych formuł. W rozdziale tym Autor zwrócił uwagę na problem multidyscyplinarnej optymalizacji w zastosowaniu do procesu modelowania zespołu składowego samolotu w odniesieniu do głównej misji statku powietrznego. Autor dysertacji zwrócił uwagę na istotę problemu wiernego modelowania rozpatrywanych problemów optymalizacji w odniesieniu do struktur lotniczych stwierdzając, że zastosowanie modeli zastępczych jest dobrym podejściem do przeprowadzenia poszukiwania optymalnego rozwiązania przy uwzględnieniu zmiennych mających decydujący wpływ na jakość uzyskanych wyników. Należy stwierdzić, że rozdział drugi stanowi swoistego rodzaju przegląd literatury i metod stosowanych obecnie w procesach optymalizacji konstrukcji lotniczych.

Rozdział trzeci pt. *Wing modeling* przedstawia proces tworzenia i modyfikację modeli matematycznych do udowodnienia postawionej tezy pracy, a który jest kluczowym elementem prowadzącym do rozwiązania problemów badawczych. Istotnym elementem tego rozdziału jest przedstawienie przeprowadzonego procesu modelowania geometrycznego struktury skrzydła samolotu. Cennym elementem tego rozdziału jest zwrócenie uwagi na zagadnienia poszukiwania optimum pomiędzy wielkościami wpływającymi na doskonałość skrzydła oraz na stateczność projektowanego skrzydła a pośrednio na cały statek powietrzny. Należy wspomnieć, że aby udowodnić tezę pracy Autor rozprawy musiał zgłębić metody: komputerowego modelowania zespołów nośnych samolotu, modelowania aerodynamiki z wykorzystaniem systemów CFD oraz metod badania stateczności statycznej i powiązania ich dla celu uzyskania optymalnego rozwiązania co jest wartością dodaną w rozpatrywanym obszarze badawczym.

Rozdział czwarty pt. *Airfoil design* przedstawia powiązania między ogólnie przyjętym procesem modelowania skrzydła a procesem doboru profilu aerodynamicznego spełniającego stawiane wymagania aerodynamiczne. Należy stwierdzić, że projektowanie profilu aerodynamicznego jest jednym z kluczowych etapów tworzenia bryły aerodynamicznej samolotu. W rozdziale czwartym Autor zaprezentował algorytm modelowania profilu aerodynamicznego. Opracowany algorytm stał się niezbędnym narzędziem do naukowych dociekań na drodze optymalizacji parametrów geometrycznych mających wpływ na wielkości współczynników aerodynamicznych: c_z , c_x , c_m , które znacząco odpowiadają za jakość aerodynamicznego projektu. Cennym elementem analizowanego rozdziału są przedstawione procesy numerycznej optymalizacji profilu aerodynamicznego na drodze niskiej i wysokiej

dokładności odwzorowania, a która posłużyła do modelowania układu aerodynamicznego mającego bezpośredni wpływ na rozmieszczenie układu siłowego projektowanego skrzydła, co stanowi wartość dodaną w przedstawionej do recenzji rozprawie.

Rozdział piąty pt. *Multidisciplinary planform design* w całości jest poświęcony udowodnieniu tezy rozprawy doktorskiej (z dobrym skutkiem). Autor przedstawił problem projektowania skrzydła samolotu gdzie główne kryterium w czterech rozpatrywanych przypadkach jest minimalizacja oporu wytwarzanego przez skrzydło. Rozpatrywane przypadki są przy następujących warunkach: a) utrzymanie siły nośnej; b) utrzymanie siły nośnej, współczynnik momentu pochylającego równy zero; c) utrzymanie siły nośnej, współczynnik momentu pochylającego równy zero, zapas stateczności większy od minimalnie dopuszczalnej wartości; d) utrzymanie siły nośnej niezbędnej (projektowej) uwzględniając minimalizację masy skrzydła, współczynnik momentu pochylającego równy zero, zapas stateczności większy od minimalnie ustalonego. Przyjęte geometryczne zmienne skrzydła dla opisanych przypadków zostały przedstawione na rysunku 5.1. Opracowany model strukturalny powiązany z modelem aerodynamicznym został wykorzystany w multidyscyplinarnym procesie optymalizacji projektowanego skrzydła samolotu. Należy zauważyć, że zaprezentowana umiejętność wykorzystania metod optymalizacji oraz przeprowadzenie algorytmizacji na potrzeby udowodnienia tezy rozprawy, świadczy o dużej wiedzy Autora z dziedziny programowania wspomagającej proces rozwiązania problemów z dyscypliny inżynieria mechaniczna i stanowi wartość dodaną do rozwoju nauki operując na złożonych multidyscyplinarnych procesach optymalizacji. Autor rozprawy wyniki analiz zestawiał w odpowiednich tabelach oraz poparł stosownymi wykresami zmian parametrów otrzymanych w wyniku realizacji multidyscyplinarnej optymalizacji skrzydła samolotu.

Rozdział szósty pt. *Multi-fidelity winglet design* zawiera algorytm nowego podejścia w procesie modelowania *wingletu* zespołu skrzydła zmniejszającego wpływ oporu indukowanego. Proces ten został zaprezentowany na bazie modeli: o niskim stopniu odwzorowania; wysokim stopniu odwzorowania oraz modelu o wysokim stopniu odwzorowania uwzględniający wiele czynników mających wpływ na projektowany *winglet*, a w efekcie na całe skrzydło. Zastosowanie modelu o wysokiej wierności odwzorowania uwzględniające wpływ wielu czynników pozwoliło Autorowi rozprawy uzyskanie dobrze uwarunkowanych wyników w procesie optymalnego kształtowania struktury *wingletu*. Proces modelowania i poszukiwanie rozwiązań optymalnych w oparciu o modele szczegółowe są stosunkowo kosztownym zadaniem i mało ekonomicznym. Stąd Autor w swoich



rozważaniach posłużył się multidyscyplinarnymi modelami zastępczymi, uzyskując zadawalające wyniki. Należy stwierdzić, że Autor w rozdziale szóstym w połączeniu z rozdziałem piątym w całości udowodnił postawioną tezę w przedstawionej do recenzji rozprawie.

Rozdział siódmy pt. *Summary* zawiera spostrzeżenia z przeprowadzonych optymalizacji modelowanych struktur składowych statku powietrznego oraz pośrednio zawiera kierunki dalszych słusznych badań. Opracowane wnioski z analiz mają swoją specjalną wartość pozwalającą prześledzić tok podejścia do przeprowadzonych badań związanych z multidyscyplinarną optymalizacją struktur lotniczych.

3. Ocena pracy

Zasadnicza wartość recenzowanej rozprawie jest związana z umiejętnym zastosowaniem przez Autora rozprawie formalizmu metod optymalizacji i implementacji ich poprzez opracowanie własnych algorytmów do komputerowych systemów obliczeniowych, modelowania matematycznego oraz przeprowadzeniu badań symulacyjnych projektowania skrzydła oraz wingletów wykorzystując multidyscyplinarną optymalizację. Numeryczną analizę (optymalizację) Autor prowadził w oparciu o modele zastępcze o dużym stopniu odwzorowania. Należy stwierdzić, że praca ma charakter aplikacyjny o bardzo dużym znaczeniu praktycznym. Jej walorem jest to, iż składa się z części modelowania matematycznego i obliczeniowej (zamieszczonej w rozdziałach piątym i szóstym), które wzajemnie się uzupełniają. Doktorant poszukiwał rozwiązań zagadnień praktycznych, o dużym znaczeniu poznawczym mającym zastosowanie w procesie poszukiwania optymalnych rozwiązań dla zespołów nośnych samolotów z multidyscyplinarnym podejściem do analizowanych przypadków. Prezentowane w pracy wyniki mają odpowiednie odniesienie do literatury, ale stanowią własne oryginalne podejście do udowodnienia tezy rozprawie. Należy zauważyć, że zaprezentowany proces multidyscyplinarnej optymalizacji kluczowych zespołów opisujących bryłę statku powietrznego zapisany została na 143 stronach w przedstawionej do recenzji rozprawie, a stanowi to tylko skrót z ogromu pracy jaką Autor musiał włożyć aby powstała aplikacyjnie tak dobra metoda wspomagająca proces projektowania samolotów.

Przedstawiona rozprawie zawiera efektywne rozwiązania ważnego zagadnienia naukowego. Jej istotną cechą jest fakt, że może być wykorzystana w niektórych dziedzinach techniki np. w procesie projektowania, w procesie syntezy bryły aerodynamicznej, badaniach statyki konstrukcji lotniczych oraz mechaniki lotu. Warto wspomnieć, że przeprowadzone symulacje



i uzyskane wyniki w pełni podkreślają, że została opracowana metoda optymalizacji struktur lotniczych. Autor rozprawy rozwiązał postawione zagadnienie stosując własne algorytmy i metody obliczeniowe oraz zastosował aparat matematyczny odpowiadający współczesnym pracom doktorskim. Należy podkreślić, że zastosowanie nowoczesnych technik symulacyjnych do badania walorów samolotu w procesie jego rozwoju w etapach projektowania podkreślają duże umiejętności Autora w zakresie modelowania procesów multidyscyplinarnej optymalizacji konstrukcji lotniczych.

Wyniki pracy są wartościowe z punktu widzenia zastosowań badawczych (naukowych), inżynierskich w procesach projektowania oraz dalekosiężnych analiz lotniczych konstrukcji cienkościennych.

Uwagi krytyczne do rozprawy

Drobna uwaga krytyczna dotycząca rozprawy wynika z braku zamieszczenia w pracy załącznika w postaci zestawień metod optymalizacji dla poszczególnych rozważanych problemów (modelowania skrzydła z wingletem, tzn. jakie metody wykorzystano) w multidyscyplinarnej optymalizacji. Zestawienie takie ułatwiłoby śledzenie otrzymanych wyników. W przedłożonej rozprawie wspomniana niedogodność jest pośrednio wyjaśniana ale w różnych miejscach przedstawionej do recenzji rozprawy co utrudnia szybkie śledzenie toku postępowania.

4. Wnioski

Rozprawa napisana jest bardzo starannie i czytelnie oraz wskazuje na duży zasób wiedzy i doświadczenia Autora w zakresie: teorii optymalizacji, modelowania matematycznego, symulacji komputerowych. Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr. inż. Witolda KLIMCZYKA w zakresie multidyscyplinarnej optymalizacji struktur lotniczych, recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko. Zasługuje ona na wyróżnienie. Uzasadnienie wyróżnienia pracy zawarte jest powyżej w treści recenzji.

Praca spełnia wymagania stawiane przez ustawę z dnia 20. lipca 2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” i może stanowić podstawę dopuszczenia do egzaminu w dyscyplinie inżynieria mechaniczna i publicznej obrony.

