

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. Inż. Mariusza Kowalskiego pod tytułem „Badanie i optymalizacja struktury nośnej kadłuba 2- silnikowego samolotu pasażerskiego z napędem hybrydowym”

### Ocena ogólna

Recenzowana rozprawa jest logicznie skomponowana, napisana zwięźle i poprawnie w sposób, który pozwala bez większych trudności zrozumieć, co Autor chciał przedstawić. Jest też bardzo dobrze zilustrowana.

Rozprawa jest efektem udziału wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej w międzynarodowym projekcie CENTRELINE, finansowanym przez Komisję Europejską w ramach programu HORYZONT 2020. Celem projektu było osiągnięcie trzeciego poziomu gotowości technologicznej dla konstrukcji samolotu pasażerskiego mającego innowacyjne rozwiązania technologiczne i konstrukcyjne, wyposażonego w dodatkowy napęd okalający kadłub w jego tylnej części (kadłub napędzany PFC). Napęd ten zwany propulsorem, zasysający warstwę przyścienną umożliwia redukcję oporów a tym samym obniża zużycie paliwa i emisję szkodliwych gazów do atmosfery. W ramach projektu trójosobowy zespół zrealizował następujące zadania:

1. Opracował parametryczny model samolotu do komputerowo wspomaganego projektowania (20 %)
2. Opracował koncepcję kadłuba geodetycznego (40%)
3. Przeprowadził analizę wytrzymałości kadłuba konwencjonalnego i geodetycznego (100%)
4. Wykonał projekt koncepcyjny struktury nośnej propulsora (60%)
5. Przeprowadził analizę wytrzymałości struktury nośnej propulsora (100%)
6. Wykonał projekt koncepcyjny centroptata (80%)
7. Przeprowadził analizę wytrzymałości centroptata (100%)
8. Wykonał oszacowanie masy projektowanej konstrukcji (33%)

W nawiasach podany został, potwierdzony przez członków zespołu, procentowy udział Doktoranta w realizacji poszczególnych zadań.

Łączny udział Doktoranta w realizowanych przez zespół zadaniach wynosił 67%, w tym 60% w opracowaniu koncepcji i 100% w obliczeniach wytrzymałości projektowanej konstrukcji.

Dodatkowym efektem zrealizowanych zadań była walidacja stosowanego oprogramowania oraz zaproponowana przez Doktoranta metoda komputerowego wspomaganego projektowania samolotu pasażerskiego mającego innowacyjny napęd hybrydowy (PFC).

W zakresie nauk inżyniersko-technicznych wykonywane zadania miały charakter badań stosowanych dla innowacyjnych napędów hybrydowych, wykorzystujących energię kinetyczną warstwy przyściennej kadłuba. Na potrzeby komputerowego wspomaganego projektu stworzony został parametryczny model konstrukcji całego samolotu, pozwalający na sprawdzanie wielu różnych konfiguracji projektowanej konstrukcji, uwzględniających również wyniki prac prowadzonych przez inne zespoły biorące udział w realizacji projektu, wpływające zarówno na geometrię zewnętrzną samolotu jak i na działające na niego obciążenia.

Aktualnie prowadzonych jest wiele prac związanych z konstrukcjami kadłubów geodetycznych, wykonywanych z zaawansowanych materiałów kompozytowych. Geodetyczna konstrukcja kadłuba składa się z zewnętrznej powłoki odpowiedzialnej za przenoszenie wewnętrznych obciążeń ciśnieniowych oraz siatki żeber odpowiedzialnych za przenoszenie obciążeń zewnętrznych. Badania wykazują, że zastosowanie konstrukcji geodetycznej do budowy kadłubów może być korzystne zarówno pod względem redukcji masy jak i wzrostu sztywności konstrukcji. Kadłub geodetyczny w porównaniu z kadłubem klasycznym o tej samej średnicy zewnętrznej ma mniejszą średnicę wewnętrzną co zapewnia zwiększoną przestrzeń użytkową w kabinie.

Doktorant przeprowadził badania porównawcze sztywności i masy struktur geodetycznej i konwencjonalnej. Badania zostały przeprowadzone na jednakowo obciążonych fragmentach kadłuba mających takie same długości i średnice oraz takie same poszycia. Każda struktura była badana w sześciu konfiguracjach. W przypadku struktury konwencjonalnej konfiguracje różniły się liczbą wręg, ich grubością i liczbą podłużnic. Natomiast w przypadku struktury geodetycznej konfiguracje różniły się liczbą żeber pierścieniowych, liczbą żeber spiralnych oraz kątami między nimi. Przeprowadzone badania wykazały, że zwiększenie liczby żeber pierścieniowych oraz zmniejszenie kąta pomiędzy żebrami spiralnymi ma korzystny wpływ na sztywność kadłuba. Porównanie średnich wartości z sześciu konfiguracji dla obu struktur pokazało, że struktura geodetyczna jest sztywniejsza (43%) oraz lżejsza (10,3%). Powyższe wyniki (a szczególnie redukcja masy) zdecydowały o zastosowaniu struktury geodetycznej w kadłubie projektowanego samolotu.

Dla trzech, rozpatrywanych w projekcie wersji zasilania (5,5 MW, 6,5 MW, 7,5MW) różniących się zarówno zewnętrzną geometrią jak i masą elementów układu napędowego przeprowadzony został iteracyjny proces projektowania struktury nośnej propulsora i jego scalenia z kadłubem. Wymagało to korekty konstrukcji nośnej kadłuba oraz zmiany rozmieszczenia stateczników poziomego i pionowego w stosunku do konwencjonalnej konstrukcji samolotu R2035. W procesie iteracyjnym konstrukcja poddawana była stopniowym modyfikacjom uwzględniającym wyniki prac wykonywanych przez inne zespoły oraz przeprowadzane obliczenia wytrzymałości dla przypadków obciążeń określonych w przepisach CS-25. W rezultacie zaproponowana została struktura o optymalnej wytrzymałości, sztywności i masie.

W oparciu o przedstawioną przez Airbus innowacyjną koncepcję jednoczęściowego centroplata kompozytowego wykonano projekty kilku wersji centroplata w celu przeprowadzenia badań porównawczych i zaproponowania optymalnego rozwiązania dla projektowanego samolotu. Przeprowadzono obliczenia porównujące centroplata o klasycznej wieloczęściowej strukturze z centroplatem jednoczęściowym wykonanym z kompozytu zbrojonego włóknem węglowym. W procesie optymalizacji struktury centroplata jednoczęściowego stosowano innowacyjne podejście wykorzystujące optymalizację topologiczną. Pozwoliło to podzielić strukturę na strefy o różnych wymaganiach odnośnie wytrzymałości. Dzięki zastosowaniu w poszczególnych strefach kompozytów o odpowiedniej strukturze udało się uzyskać konstrukcję centroplata o bardzo dobrym stosunku wytrzymałości do masy. Z rozkładów współczynnika wytrzymałości SR wynika, że w konstrukcji nie ma zbyt wielu obszarów przewymiarowanych. W znacznej części konstrukcji wartość współczynnika SR jest mniejsza niż 2, a minimalna jego wartość wynosi 1,095. Maksymalna wartość przemieszczenia wynosi 50mm, co jest wartością mieszczącą się w założonych, dopuszczalnych granicach. Zaprojektowany model konstrukcji został sparametryzowany, aby ułatwić modyfikację i optymalizację. Opracowano parametryczne modele kadłuba, skrzydła, usterzenia i struktury nośnej propulsora. Kadłub został podzielony na sekcje. Sekcje cylindryczne (łącznie około 65% powierzchni kadłuba) zaprojektowano jako konstrukcje geodetyczne, natomiast pozostałe zaprojektowano jako konstrukcje konwencjonalne. Dla optymalizacji geodetycznej konstrukcji kadłuba zdefiniowano następujące zmienne: liczba żeber

pierścieniowych, liczba żeber spiralnych, kąt między żebrami spiralnymi. Dla konwencjonalnej konstrukcji kadłuba jako zmienne przyjęto: liczbę wręg, liczbę podłużnic, grubość wręg. Sparametryzowana została również konstrukcja usterzenia. Dla statecznika poziomego zdefiniowano następujące zmienne: liczba żeber, grubość żeber, grubość dźwigarów, grubość poszycia. Dla statecznika pionowego zdefiniowano podobne parametry. Dla wybranych koncepcji konstrukcji i przypadków obciążenia (dziewięciu) przeprowadzono analizy metodą elementów skończonych. Celem optymalizacji iteracyjnej było uzyskanie zadawalającej wytrzymałości (wartości współczynnika wytrzymałości bliskiego 1,5) oraz sztywności (w ekstremalnym przypadku obciążania wartość przemieszczeń poniżej 300 mm), przy zachowaniu możliwie najmniejszej masy konstrukcji.

Do oceny koncepcji kadłuba napędzanego PFC zostały zdefiniowane dwie rodziny konwencjonalnych samolotów referencyjnych: samolot R2000 odzwierciedlający rok eksploatacji 2000 oraz zaawansowany model R2035, wyposażony w prognozowane dla roku 2035 technologie. Samolot R2000 służył do oceny koncepcji PFC w odniesieniu do celów środowiskowych na rok 2035 określonych w strategicznym programie badań i innowacji (SRIA) Rady Doradczej do spraw badań aeronautycznych w Europie (ACARE). Natomiast samolot R2035 służył jako bezpośredni punkt odniesienia dla koncepcji PFC. Ostateczny projekt koncepcyjny samolotu PFC został poddany kompleksowej ocenie porównawczej względem obu samolotów referencyjnych. Dokonana ocena koncepcji samolotu PFC przewiduje: redukcję zużycia paliwa (3,2 %), spadek emisji CO<sub>2</sub> i NO<sub>x</sub> (nawet do 64 %), obniżenie poziomu hałasu (12 EPN dB). Sformułowano kierunki dalszych działań mających szybko doprowadzić projekt do szóstego poziomu gotowości technologicznej.

Rozprawa zawiera obszerny przegląd literatury związanej z projektem, dotyczącej zasysania warstwy przyściennej oraz struktury kadłuba.

Dodatkowym efektem zrealizowanych prac jest sześć publikacji: jednej w renomowanym czasopiśmie, trzech w materiałach konferencyjnych i dwóch w sprawozdaniach, którym współautorem jest Doktorant.

### **Uwagi szczegółowe**

Słowo metodologia określa naukę o metodach badań naukowych i skutecznych sposobach dociekania ich wartości poznawczych. Jest ono przez Autora błędnie interpretowane i używane (patrz str. 16). W pracy rozważane są metody, ewentualnie metodyki a nie metodologie.

Niektóre rysunki opisane są po angielsku a nie po polsku (np. rysunki 3, 5, 30, 39, 74).

Należało używać jednego określenia pokrycie (np. strony 36,37) lub lepiej poszycie (np. strony 32, 91).

Do określenia masy należy unikać słowa waga (np. strona 17, 31).

Strona 30 powinno być izotropowości a nie izentropowości.

Strona 31 dwukrotnie opisany jest ten sam parametr  $X_T$ .

### **Wniosek końcowy**

Sformułowany cel pracy, mającej charakter badań stosowanych oraz postępowanie zapewniające jego realizację wskazują, że mgr inż. Mariusz Kowalski posiada bardzo dobrą wiedzę w zakresie specjalności, której dotyczy temat rozprawy. Biorąc pod uwagę: po pierwsze wykazane przez Autora umiejętności do samodzielnego prowadzenia prac naukowo badawczych oraz przedstawioną rozprawę, której rezultaty zostały wykorzystane w międzynarodowym projekcie samolotu pasażerskiego mającym innowacyjny napęd wykorzystujący zasysanie warstwy przyściennej, po drugie zaproponowaną przez

Doktoranta metodykę komputerowo wspomaganego projektowania samolotów pasażerskich z napędem hybrydowym oraz po trzecie współautorstwo w sześciu publikacjach związanych tematycznie z rozprawą: jednej w renomowanym czasopiśmie, trzech w materiałach konferencyjnych i dwóch w sprawozdaniach uważam, że zgodnie z obowiązującymi przepisami recenzowana rozprawa spełnia w sposób zasługujący na wyróżnienie wymagania stawiane pracom doktorskim i może zostać dopuszczona do obrony.

*W. Bonde*