

Dr hab. inż. Andrzej Majka, prof. PRz
Katedra Inżynierii Lotniczej i Kosmicznej
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
Tel.: +48 17 865 16 04
Andrzej.majka@prz.edu.pl
<https://kilik.prz.edu.pl/>

Rzeszów, 2022-01-10

RECENZJA

**Rozprawy doktorskiej
mgr inż. Adama Antczaka**

nt. „Optymalizacja położenia samolotów podczas lotu w formacji”

promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Sławomir Sibilski

promotor pomocniczy: dr inż. Maciej Lasek

Podstawa formalna opracowania recenzji

Recenzję opracowano na prośbę Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej, będącą konsekwencją Uchwały Rady Naukowej Dyscypliny z dnia 6.10.2021 r. (pismo o sygnaturze RNDIM/521/17/2021 z dnia 20.10.2021).

Ocena wyboru tematu

Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Antczaka odnosi się do bardzo ważnej i aktualnej tematyki związanej z poprawą efektywności transportu lotniczego oraz możliwościami obniżenia negatywnego wpływu samolotów transportowych na środowisko naturalne.

Jednym z głównych motorów gospodarczych i społecznych przyczyniających się do poprawy warunków życia społeczeństw jest transport lotniczy oraz przemysł pracujący na jego potrzeby. Pomimo znacznego rozwoju, transport lotniczy boryka się z wieloma poważnymi przeszkodami, w tym nadmiernym zużyciem paliwa, rosnącymi kosztami eksploatacyjnymi wynikającymi m.in. z rosnących cen paliw, rosnącym natężeniem ruchu lotniczego, rosnącą konkurencyjnością, kryzysami gospodarczymi, negatywnym wpływem na środowisko naturalne, kwestiami bezpieczeństwa oraz wyzwaniem operacyjnymi.

Duże zużycie paliw kopalnych jest kluczowym aspektem dla rozwoju branży lotniczej, ponieważ wpływa na wzrost cen ropy naftowej oraz przyczynia się do rosnącego zanieczyszczenia środowiska. Redukcja zużycia paliwa ogranicza te niekorzystne zjawiska, oraz spowalnia ubytek nieodnawialnych zasobów naturalnych Ziemi.

Efektywność energetyczna samolotów transportowych uległa dwukrotnej poprawie w stosunku do lat 70 ubiegłego wieku, ograniczając rosnące zużycie paliw. Jednak rosnąca intensywność ruchu lotniczego spowodowała 40 krotny wzrost zapotrzebowania na paliwa lotnicze w ciągu ostatnich 50 lat. Obecnie, paliwa lotnicze stanowią od 2% do 3% całkowitego zużycia paliw kopalnych, z czego ponad 80% wykorzystywane jest w lotnictwie cywilnym. Przewiduje się, że natężenie ruchu lotniczego, z pominięciem efektu pandemii COVID-19, będzie wzrastać w najbliższych latach o ok. 5% rocznie, a temu będzie towarzyszył wzrost zużycia paliwa o ok. 3% rocznie.

Szybki rozwój transportu lotniczego na przestrzeni ostatnich 50 lat, w szczególności w zakresie przewozów pasażerskich, nie pozostał bez wpływu na środowisko naturalne. Badania w tej dziedzinie pokazują jego negatywne skutki zarówno lokalnie, wokół lotnisk, jak i globalnie, biorąc pod uwagę kwestie zmiany klimatu i zanieczyszczenia powietrza. Co więcej, w ciągu ostatnich 10 lat wzrosła społeczna świadomość ekologiczna, co przekłada się na zwiększenie politycznej presji na zarządzanie środowiskiem. W związku z powyższym ochrona środowiska stała się priorytetem w przemyśle i transporcie lotniczym.

Podczas gdy 90% lotów wykonywanych przez samoloty transportowe odbywa się na trasach krótkich i średnich, nie przekraczających 3500 km, to jednak loty międzykontynentalne generują najwyższy udział zużycia paliwa i niekorzystnych emisji środowiskowych. 10 % lotów wykonywanych na trasach powyżej 3500 km jest źródłem 54% zużycia paliwa oraz w takiej samej proporcji emisji CO₂. Oznacza to, że większość emisji CO₂ pochodzi z lotów dalekodystansowych.

Jedną z koncepcji poprawy wydajności operacyjnej, która nie jest jeszcze stosowana, ale może zapewnić oszczędności w zużyciu paliwa i ograniczyć niekorzystne emisje CO₂ w lotach na dużych dystansach, jest lot w formacji. Lot formacyjny to praktyka latania dwoma lub więcej samolotami w określonym układzie, w celu zmniejszenia oporu indukowanego samolotu lecącego za samolotem prowadzącym. Koncepcja ta została zainspirowana zachowaniem ptaków wykonujących dalekie przeloty, formujących tzw. klucze. Prace badawcze prowadzone od wielu lat wykazały zauważalne korzyści aerodynamiczne wynikające z lotu w formacji, zarówno w odniesieniu do ptaków jak i samolotów. Część z tych prac dotyczyła oszacowania korzyści wynikających z lotów w formacji takich samolotów jak Boeing 777, Boeing 757, Airbus A320 i Airbus A300, z określeniem warunków wykonania lotu niezbędnych do poprawy efektywności. Recenzowana praca stanowi rozwinięcie tej tematyki i dotyczy zagadnienia optymalizacji wzajemnego położenia samolotów wykonujących lot w formacji, a także określenia obciążeń działających na samolot lecący w śladzie aerodynamicznym lidera.

Dodatkowo autor przeprowadził analizę możliwości wdrożenia lotów w formacji do praktyki operacyjnej przedsiębiorstwa, z punktu widzenia wymagań formalno-prawnych, zasad bezpieczeństwa i względów operacyjnych. Autor opracował założenia, których spełnienie pozwoli linii lotniczej wdrożyć lot w formacji, a metodą symulacyjną dokonał walidacji zaproponowanego procesu planowania lotu. Dużą wartością pracy są oszacowane korzyści jakich może oczekiwać średniej wielkości linia lotnicza w związku z wprowadzeniem lotów w formacji.

Recenzowana praca stanowi istotne przybliżenie pierwszego rzędu w odniesieniu do korzyści, których można oczekiwać dzięki wprowadzaniu nowatorskiej metody wykonywania lotów dalekodystansowych, zwracając uwagę na wyzwania regulacyjne i logistyczne, które należy przezwyciężyć, aby te korzyści uzyskać.

W wymienionych aspektach tematyka podjęta w ramach rozprawy doktorskiej przez Pana Adama Antczaka bardzo dobrze wpisuje się w cele i zakresy najnowszych badań nad poprawą efektywności transportu lotniczego i stanowi bardzo dobry przyczynek do dyskusji nad celowością wdrożenia lotów dalekodystansowych wykonywanych w formacji.

Ocena merytoryczna

Do najważniejszych problemów dotyczących transportu lotniczego należy poprawa efektywności jego funkcjonowania, obniżenie zużycia paliwa oraz zmniejszenie negatywnego oddziaływania na środowisko naturalne. Oprócz długofalowych rozwiązań strategicznych, które przynoszą efekty w dłuższej perspektywie należy również pracować nad rozwiązaniami doraźnymi, których efekty pojawiają się natychmiast. Do grupy takich rozwiązań doraźnych zaliczyć można zmianę sposobu wykonywania lotów dalekodystansowych, polegającą na grupowaniu lecących samolotów w pary poruszające się wspólnie w ramach formacji. Korzyści jakich można oczekiwać w wyniku takiego sposobu wykonywania lotu to zaoszczędzenie od 5 do 10 % paliwa, zmniejszenie emisji CO₂ w tej samej skali oraz zwiększenie przepustowości przestrzeni powietrznej (formacja jest traktowana jak jeden obiekt).

Dotychczas prowadzone prace koncentrowały się na ocenie korzyści aerodynamicznych wynikających z wykonywaniu lotów w formacji, dzięki zmniejszeniu oporu indukowanego na płacie samolotu lecącego w śladzie. Autor pracy w sposób kompleksowy podszedł do zagadnienia lotów w formacji, uwzględniając nie tylko korzyści z nich wynikające, ale także analizując możliwości wykonywania tego typu lotów w praktyce operacyjnej.

Zasadnicza część pracy doktorskiej Pana Adama Antczaka może zostać podzielona na dwie główne części. Pierwsza część dotyczy zagadnień aerodynamiki i fizyki lotu oraz oszacowania korzyści wynikających z obniżenia oporu indukowanego samolotu skrzydłowego lecącego w formacji dwusamolotowej. Druga część skupia się na aspektach formalno-prawnych oraz operacyjnych związanych z możliwością wykonywania lotów w formacji.

Przyjęta koncepcja metodologiczna pracy jest właściwa. Na podstawie studium literatury oraz własnego doświadczenia zawodowego, Autor sformułował cel główny pracy oraz 5 celów szczegółowych, które stanowią plan badań. Zarówno plan badań jak i cele badawcze należy uznać za właściwe i kompletne. Zaplanowane badania i symulacje były niezbędne do osiągnięcia celów badawczych i potwierdzenia prawdziwości postawionej tezy.

Wszystkie prace zaplanowane do realizacji w ramach pracy doktorskiej miały charakter badawczy, ukierunkowany na poszerzenie wiedzy na temat aerodynamiki i fizyki lotu samolotów wykonujących lot w formacji dwusamolotowej. Pierwszym etapem prac była optymalizacja wzajemnego usytuowania samolotów lecących w formacji w celu minimalizacji ciągu niezbędnego do lotu samolotu skrzydłowego. Zadanie to zostało zrealizowane z wykorzystaniem specjalnie opracowanego, aerodynamicznego modelu obliczeniowego oraz odpowiednio dobranej metody optymalizacji. Przyjęte założenia upraszczające zdeterminowały separację pionową obu samolotów i w przyszłości należałoby model obliczeniowy uzupełnić o efekt odchylenia w dół płaszczyzny wirowej. Uzyskane rezultaty wskazują na duży potencjał w zakresie redukcji ciągu niezbędnego do lotu samolotu skrzydłowego, w funkcji wielkości separacji podłużnej i poprzecznej.

Autor dodatkowo przeanalizował zmianę obciążeń płata samolotu skrzydłowego w wyniku oddziaływania strug zaskrzydłowych samolotu lidera. Przeprowadzone analizy wymagały opracowania nowego modelu obliczeniowego oraz przyjęcia metody wyznaczania obciążeń na skrzydle. Zastosowana metoda pasowa jest właściwa i wystarczająca do obliczenia rozkładu prędkości generowanych przez płat samolotu lidera w obszarze płata samolotu skrzydłowego. Obciążenia wyznaczono metodą Schrenka, która przy typowych proporcjach geometrycznych skrzydeł dużych samolotów transportowych jest całkowicie wystarczająca. Wyniki ukazały niewielki wpływ negatywny lotu w formacji na obciążenia jakim podlega płat nośny samolotu skrzydłowego.

Drugą część pracy autor rozpoczął od analizy obowiązujących przepisów, wskazując na istnienie podstaw prawnych umożliwiających organizację lotów w formacji. Zarówno wytyczne ICAO jak i specyfikacje Eurocontrol zezwalają na lot w formacji pod warunkiem przeprowadzenia go w bezpiecznych warunkach. Dopuszczenie wykonywania lotów w formacji przez linie lotnicze wymaga jednak opracowania i uchwalenia dodatkowych przepisów na poziomie krajowym a następnie opracowania odpowiednich zapisów w instrukcji operacyjnej. Potrzeba dążenia do poszukiwania metod redukcji śladu węglowego latających samolotów, stanowi wystarczające uzasadnienie do opracowania warunków formalno-prawnych do wykonywania lotów w formacji. Autor zwrócił również uwagę na fakt, że efekt pandemii Covid-19 wzmocnił jeszcze potrzebę poszukiwania metod poprawiających efektywność funkcjonowania linii lotniczych, ze względu na pogarszającą się kondycję ekonomiczną tych przedsiębiorstw. Po przeanalizowaniu istniejącego

stanu

prawnego,

Autor

sformułował ogólne wymagania jakie muszą spełniać opracowane procedury operacyjne, aby wykonywanie lotów w formacji było wykonalne i bezpieczne.

W ramach analizy wdrożeniowej, autor dokonał oceny opłacalności i możliwości realizacji lotów w formacji w linii lotniczej. Sprawdzenia wykonalności lotów w formacji autor dokonał poprzez analizę możliwości zmiany procesu planowania lotów pod kątem lotów w formacji. W tym celu opracował modele opisujące najważniejsze etapy procesu planowania lotu wykorzystując notację Business Process Modelling and Notation (BPMN 2.0). Analiza procesu i podprocesów planowania lotu, pozwolił określić autorowi warunki wykonalności lotu w formacji z punktu widzenia efektywności realizacji procesu. Autor sformułował również szereg propozycji modyfikacji działania istniejącego systemu, które umożliwią efektywnie planować loty w formacji przez działy planowania lotów linii lotniczych.

Przeprowadzone symulacje pozwoliły na określenie spodziewanych korzyści z wykonywania lotów w formacji, dla założonej siatki połączeń atlantyckich PLL LOT. Analizy wykazały, że opóźnienia startu większe niż 20 minut sprawiają, że lot w formacji przestaje mieć sens. Dla mniejszych opóźnień określono korzyści dla poszczególnych tras, wariantując różnice czasów startu poszczególnych samolotów tworzących formację. Wyniki analiz wskazują, na duże możliwe oszczędności dla linii lotniczej przy zachowaniu surowych wymagań odnośnie punktualności wylotów samolotów. Dodatkowym aspektem będzie obniżenie śladu węglowego samolotów.

Przedstawione przez Autora wyniki i wnioski stanowią ważny krok w kierunku określenia warunków wykonywania lotów w formacji, zarówno z punktu widzenia efektywności aerodynamicznej jak i z punktu widzenia uwarunkowań formalno-prawnych oraz operacyjnych. Pozyskana wiedza pozwoli na zaproponowanie odpowiednich zapisów regulacyjnych oraz określenie wymagań operacyjnych dotyczących organizacji wykonywania lotów w formacji.

Uwagi szczegółowe

Praca zawarta została na 118 stronach, z czego 100 stron stanowi zasadniczą jej część. Składa się 6 rozdziałów merytorycznych, wstępu, podsumowania oraz spisów rysunków, tabel i symboli, spisu literatury oraz streszczenia.

We wstępie autor krótko przedstawił tematykę rozprawy, zdefiniował oraz wyjaśnił kluczowe pojęcia i zagadnienia, a także omówił zawartość i układ treści opracowania.

W rozdziale drugim autor zaprezentował zastosowaną metodologię badawczą. Sformułował w nim główny cel badawczy oraz 5 celów cząstkowych. Cele cząstkowe, których realizacja będzie również oznaczała osiągnięcie celu głównego, mogą być traktowane jako plan badań. W końcowej części rozdziału została sformułowana teza, której prawdziwość była wykazywana w trakcie realizacji poszczególnych zadań wynikających z planu badawczego.

Rozdział trzeci dotyczy zagadnienia lotu w formacji. Autor podał genezę oraz przykłady wykorzystywania lotów w formacji, odwołując się zarówno do świata zwierząt jak i praktyki operacyjnej wykonywania lotów przez samoloty wojskowe. Autor omówił również rozwiązania techniczne ułatwiające wykonywanie lotów w formacji i podnoszących ich bezpieczeństwo. Opisane wyniki badań wskazują na istniejący potencjał wykorzystania lotów w formacji do obniżenia zużycia paliwa oraz emisji samolotów, w szczególności wykonujących dalekie przeloty. Omówione zostały również prace realizowane przez zespół AVT-279 w ramach NATO STO. W pracach tych czynny udział brał autor recenzowanej pracy doktorskiej. Wyniki prac wskazały potencjalne korzyści związane z realizacją lotów w formacji oraz pozwoliły na sformułowanie wymagań operacyjnych oraz dotyczących wyposażenia pokładowego niezbędnego do przeprowadzenia lotu w formacji.

W rozdziale czwartym autor omówił zagadnienie kształtowania się wirów zaskrzydłowych oraz przedstawił rozwiązanie problemu określenia optymalnego położenia samolotu lidera i samolotu skrzydłowego, lecących w formacji. W celu rozwiązania tego problemu, należało opracować model obliczeniowy pozwalający na wyznaczenie oddziaływania wirów generowanych przez samolot lidera na płat nośny samolotu skrzydłowego. Autor z wykorzystaniem opracowanego modelu dokonał optymalizacji położenia samolotu skrzydłowego względem samolotu lidera, przyjmując odpowiednie założenia upraszczające, które zostały jasno i wyczerpująco opisane w rozdziale. W końcowej części rozdziału przedstawione zostały wyniki obliczeń wykonanych dla samolotu Boeing B767-300.

Rozdział piąty zawiera analizę obciążeń działających na płat nośny samolotu skrzydłowego w porównaniu do obciążeń działających na płat samolotu wykonującego lot solowy, w takich samych warunkach. Rozkład sił aerodynamicznych obliczony został metodą pasową, dla obliczonych wartości prędkości indukowanych przez samolot lidera. Obciążenia na płacie nośnym samolotu skrzydłowego wyznaczono metodą Schrenka. Przyjęte założenia i zastosowane metody są wystarczające do oszacowania wielkości obciążeń na wstępnym etapie analiz.

W rozdziale szóstym scharakteryzowano uwarunkowania formalno-prawne odnoszące się do możliwości wykonywania lotów w formacji. Autor przeanalizował wytyczne ICAO oraz regulacje prawne opracowane przez EASA, z których wynika możliwość wykonywania tego typu operacji. Autor odniósł się również do zagadnień bezpieczeństwa i efektywności realizacji lotów przez cywilne przedsiębiorstwa komercyjne, z uwzględnieniem możliwości wykonywania lotów w formacji.

Rozdział siódmy opisuje analizę możliwości wdrożenia nowego sposobu wykonywania lotów na dalekich trasach z wykorzystaniem notacji Business Process Modelling and Notation (BPMN). Notacja pozwala na opisanie różnych procesów biznesowych, dając możliwość dokonania analizy różnych przypadków i scenariuszy realizacji lotów w formacji. Autor uwzględnił wszystkie najważniejsze etapy planowania lotu, zarówno dla procesu tradycyjnego

jak i dla procesu zmodyfikowanego pod potrzeby planowania lotu w formacji. Opracowane diagramy procesowe zostały wykorzystane do przeprowadzenia symulacji, na podstawie których określono efektywność lotów dla wybranych tras. Analiza siatki połączeń, dla przyjętych założeń, pozwoliła wykazać możliwość realizacji lotów w formacji na wybranych trasach oraz umożliwiła określenie spodziewanych oszczędności.

Rozdział ósmy zawiera podsumowanie badań zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej, z omówieniem najważniejszych uwag i wniosków końcowych. Rozdział zawiera również propozycje kierunków dalszych badań.

Ocena strony edytorskiej

Praca napisana jest językiem poprawnym i precyzyjnym. Strona edytorska pracy spełnia najwyższe przyjęte standardy. Układ pracy jest przejrzysty, a podział treści rozprawy na rozdziały i podrozdziały oraz ich kolejność, nie budzą zastrzeżeń. Terminologia i pojęcia stosowane w pracy są zazwyczaj poprawnie używane. Materiały ilustracyjne oraz tabele i wykresy zostały zamieszczone w pracy w sposób właściwy i logiczny, uzupełniając opisywane treści.

Uwagi krytyczne

Mimo wysokiej oceny merytorycznej przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej, nasuwają się niewielkie uwagi o charakterze krytycznym.

Do oznaczenia siły nośnej i siły oporu autor wykorzystał symbol L i D . Natomiast współczynniki siły nośnej i siły oporu oznaczył odpowiednio C_z i C_x . Stanowi to niekonsekwencję przyjętego systemu oznaczeń.

Praca zawiera niewielką liczbę błędów językowych. W liście symboli „ y ” został opisany jako „grubość panelu”. Poprawnie było by nazwać tę wielkość szerokością panelu. Na stronie 13 (rozdział 3.5) użyto sformułowania „najbardziej optymalny”. Na stronie 30 użyto sformułowania „długości skrzydeł samolotu lidera”. Na stronie 20 (rozdział 4.2) znalazł się błąd w sformułowaniu „W związku z tą zależnością powietrze opływające górną i dolną powierzchnię przemieszcza się od wewnętrznej części skrzydła do jego końcówki, symetrycznie po obu stronach skrzydła”.

Wykresy 5.6, 5.7 oraz 5.8 wymagają komentarza i legendy. Trudno jest zinterpretować znaczenie krzywych znajdujących się na wykresie.

Można również zastanowić się na celowości umieszczania całych fragmentów przepisów w rozdziale 6, w części zasadniczej pracy. Być może lepszym rozwiązaniem byłoby umieszczenie w części zasadniczej tylko wniosków wynikających z odpowiednich zapisów, ułatwiając zrozumienie opisywanego problemu. Natomiast cytowane fragmenty mogłyby być przeniesione do załącznika.

Konkluzje

Przedstawioną do recenzji pracę oceniam bardzo dobrze i uważam że została wykonana na bardzo wysokim poziomie merytorycznym. Praca ma charakter interdyscyplinarny, łącząc zagadnienia techniczne i formalno-prawne oraz operacyjne, dotyczące możliwości realizacji lotów dalekodystansowych w formacji. Treści merytoryczne zawarte w pracy świadczą o dużej dojrzałości naukowej i wiedzy merytorycznej Doktoranta.

Zaprezentowane w rozprawie wyniki badań są oryginalnym dorobkiem naukowym Doktoranta, a rezultaty pracy mają duże znaczenie praktyczne. Zawarte w rozprawie badania i analizy są przeprowadzone na wysokim poziomie merytorycznym, a ich wyniki rozszerzają wiedzę z zakresu osiągnięć samolotów wykonujących loty dalekodystansowe w formacji oraz uwarunkowań formalno-prawnych jak i operacyjnych związanych z przygotowaniem i realizacją takich lotów.

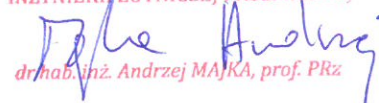
Reasumując, drobne uwagi krytyczne nie umniejszają wysokiej wartości merytorycznej pracy. Na uwagę zasługują następujące elementy:

- uzasadnienie podjęcia tematu rozprawy, które wynika z bieżących potrzeb dotyczących poprawy efektywności funkcjonowania transportu lotniczego i potrzeby obniżenia jego niekorzystnego oddziaływania na środowisko naturalne,
- trafne zdefiniowanie przedmiotu badań i celów rozprawy,
- wysoki poziom merytoryczny pracy i znajomość rozważanej tematyki,
- oryginalne i ciekawe wyniki analiz symulacyjnych,
- umiejętność korzystania z literatury naukowej,
- przejrzysta i logicznie ułożona struktura pracy oraz jej cel i zakres.

Biorąc pod uwagę istotność i aktualność tematyki pracy doktorskiej, osiągnięte wyniki badawcze a także ich duże znaczenie naukowe oraz praktyczne stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Adama Antczaka spełnia warunki merytoryczne i formalne stawiane pracom doktorskim i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Uwzględniając wysoki poziom merytoryczny rozprawy, w tym nowatorstwo i oryginalność przeprowadzonych prac badawczych, wnoszę do Wysokiej Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej o przyznanie wyróżnienia przedłożonej mi do oceny rozprawie doktorskiej Pana mgr. inż. Adama Antczaka.

KIEROWNIK KATEDRY
INŻYNIERIA LOTNICZEJ I KOSMICZNEJ


dr hab. inż. Andrzej MAJKA, prof. PRz