

dr hab. inż. pil. Leszek Cwojdzński

Airbus Poland S.A.

Aleja Krakowska 110/114

02 - 256 Warszawa

Poznań, 23 lutego 2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Daniela LICHONIA

nt. "Identyfikacja charakterystyk operacyjnych nieautonomicznych powietrznych statków bezzałogowych dla potrzeb wykonywania lotów w przestrzeni kontrolowanej"

Podstawę do opracowania recenzji pracy doktorskiej mgr inż. Daniela Lichonia stanowi pismo dra hab. inż. Andrzeja Burghardta, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 15 grudnia 2021 r.

Praca zawarta jest na 132 stronach i jest podzielona na 7 rozdziałów poprzedzonych: spisem akronimów, spisem oznaczeń, wstępem, a w zakończeniu wnioskami oraz spisem liczącym 173 pozycje literatury związanej z tematem pracy. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Andrzej Majka.

1. Uwagi wstępne

Postępy w rozwoju wiedzy na temat problematyki wykonywania lotów we wspólnej, kontrolowanej przestrzeni powietrznej, przez bezzałogowe platformy latające i załogowe statki powietrzne są jednym z obszarów badań zorientowanych na zachodzące w niej procesy z wykorzystaniem analizy systemowej, będącej odpowiednim narzędziem dla tego typu rozwiązań. Cyklicznie podejmowane przez organizacje lotnicze działania związane z programowaniem ich rozwoju, są jednym z najważniejszych procesów decydujących o ich kształcie i planowanych do osiągnięcia zdolnościach operacyjnych do poziomu określonego w aktach prawnych oraz strategicznych dokumentach dotyczących optymalnego i bezpiecznego wykorzystania poszczególnych rodzajów przestrzeni powietrznej, których przynależność określana jest przez organ państwowego nadzoru lotniczego wspólnie z państwowym cywilnym organem ruchu lotniczego oraz lotnictwem wojskowym.

Przyczyną podjęcia badań w kierunku zastosowania narzędzi analizy systemowej prowadzącej do opracowania nowatorskiego modelu porównawczego była identyfikacja obwiedni charakterystyk operacyjnych RPA w realizacji procedur SID i STAR. Odlatując z zatłoczonych lotnisk lub podchodząc na nich do lądowania statki powietrzne rzadko podążają najkrótszą możliwą trasą, standardowo wykonując lot wg. tzw. tras odlotu SID (ang. Standard Instrument Departure) i dolotu STAR (ang. Standard Terminal Arrival Route), opracowanych w celu zapewnienia bezpieczeństwa statkom powietrznym.

W recenzowanej pracy Doktorant poruszył problematykę integracji bezzałogowych nieautonomicznych statków powietrznych w przestrzeni powietrznej kontrolowanej, celem której było określenie obwiedni charakterystyk aerodynamicznych i cech konstrukcyjnych zdalnie pilotowanych samolotów spełniających wymagania integracji z lotnictwem załogowym w jednolitej kontrolowanej przestrzeni powietrznej. Obiektem badań były samoloty bezzałogowe małe MTOM=25 kg i średnie MTOM=450kg. Realizując zadania lotnicze zidentyfikowano różnice w osiągnięciach RPA względem załogowych statków powietrznych. Przeprowadzono badania wpływu obecności RPA na załogowy ruch lotniczy, oraz możliwości integracji platform bezzałogowych w procedurach projektowanych dla lotnictwa załogowego. Jako krytyczny element przestrzeni kontrolowanej wybrano CTR/TMA lotniska (ang. Control Zone/ Terminal Control Area) i procedury odejścia i podejścia z lotnisk kontrolowanych (SID i STAR), w których znajdują się segmenty zniżania, wznoszenia oraz lotu poziomego.

Problem badawczy pracy opisano w ujęciu analizy systemowej, wyodrębniając system RPA-SID/STAR-atmosfera. Opracowano i zbudowano modele RPA oraz procedury SID i STAR. Modele RPA uwzględniają trajektorię lotu, osiągi w locie ustalonym, geometrię płatowca, charakterystyki aerodynamiczne, masy i obciążenia samolotu oraz charakterystyki zespołu napędowego. Określono minimalną liczbę trzech zmiennych decyzyjnych modelu RPA, tj. masy startowej, obciążenia powierzchni oraz obciążenia mocy. Modele procedur SID i STAR uwzględniają proceduralną trajektorię załogowych statków powietrznych, oraz obszar tolerancji. Określono referencyjny kształt proceduralnej trajektorii wykorzystując statystykę istniejących procedur oraz wytyczne PAŻP do ich projektowania. Wykorzystaną metodą badawczą były symulacje szybkie (FTS), umożliwiające badanie wielu wariantów RPA w zróżnicowanych procedurach i warunkach oddziaływania wiatru. Zbudowano oprogramowanie symulacyjne w środowisku Matlab, w którym dokonano implementacji numerycznej modeli RPA, SID i STAR. W dalszej części pracy Doktorant dokonał określenia kryteriów oceny integracji (PI) w dwóch obszarach rozwoju ATM, tj. bezpieczeństwa

i efektywności. Metryką oceny bezpieczeństwa było wykonanie lotu przez RPA wzdłuż trajektorii proceduralnej (położenie względne).

Metrykami oceny efektywności były czas lotu RPA względem samolotu załogowego w procedurach SID i STAR oraz zgodność z kategorią prędkościową statków powietrznych (wg. standardów ICAO). Metody te oparte są na przesłankach teoretycznych, metodach doświadczalnych a w ostatnich latach na wykorzystaniu pakietów technologii cyfrowej. Opanowanie i użycie tych metod wymaga głębokiej wiedzy i doświadczenia o programach wspomagających z wielu dziedzin pokrewnych. Szeroki zasób wiedzy i doświadczenia mgr inż. Daniela LICHONIA pozwoliły na podjęcie tematu zaprezentowanego w tej dynamicznie rozwijającej się dziedzinie jaką jest wykorzystanie analizy systemowej do optymalizacji wybranych zagadnień projektowania i budowy bezzałogowych platform latających oraz procedur SID i STAR.

2. Omówienie pracy

Doskonalenie bezpiecznego wykorzystania kontrolowanej przestrzeni powietrznej, przez załogowe i bezzałogowe statki powietrzne poprzez wykorzystanie dostępnych narzędzi analizy systemowej architektury przestrzeni powietrznej, jej kształtowania i funkcjonowania pozostaje niezmiennie istotnym zagadnieniem. Ma ono znaczenie zarówno dla efektywnego projektowania załogowych i bezzałogowych statków powietrznych, zapewnienia właściwej interakcji między nimi, oraz wykorzystania narzędzi pozwalających na usprawnienia w zarządzaniu ruchem lotniczym.

Analiza literatury i doświadczenie Doktoranta oraz wyniki prowadzonych badań wskazują, iż w zakresie literatury przedmiotu zagadnienie modelowania lotu samolotów bezzałogowych przy zastosowaniu analizy systemowej nie było do tej pory szeroko podejmowane. Doktorant podjął próbę wykorzystania metod analizy systemowej prowadzących do poprawy efektywności bezpieczeństwa lotów poprzez wyodrębnienie i sklasyfikowanie charakterystyk i własności aerodynamicznych, ustalenie ich powiązań i relacji pomiędzy nimi a badanym procesem realizacji procedur RPA-SID/STAR.

Wnioski zebrane w trakcie analizy obszaru badawczego, szczególnie w kontekście wykorzystania metod analizy systemowej i modelowania wskazały na potrzebę opracowania modelu, który poddano walidacji, wykorzystując obwiednię osiągową samolotu bezzałogowego RQ 2A Pioneer. Porównano obwiednię osiągową wygenerowaną w modelu symulacyjnym RPA oraz dostępną w bazie BADA, oraz uzyskano zgodność badanych

charakterystyk aerodynamicznych RPA na poziomie 2,8%. Analiza obwiedni osiągow wykazała, że model symulacyjny był adekwatny do wykorzystania w badaniach, ponieważ w zakresie prędkości operacyjnych i wysokości odpowiadającym lotom proceduralnym wykazywał zgodność z bazą BADA.

Przyjęta w pracy procedura badawcza ukierunkowana została na zidentyfikowanie i analizę podobieństw i różnic dotyczących realizacji lotów wg procedur, ich powiązań oraz wpływu na proces zarządzania ruchem lotniczym oraz bezpieczeństwo operacji startu i odlotu oraz zniżania i podejścia do lądowania prowadzący do poprawy jego funkcjonowania. Dzięki umiejętnie dobranym narzędziom badawczym opracowano model geometryczny RPA, który został poddany walidacji i wykorzystany do oceny zdolności wykonania przyjętych procedur RPA-SID/STAR w zróżnicowanych warunkach atmosferycznych. W rezultacie osiągnięto zidentyfikowanie obwiedni charakterystyk operacyjnych RPA w realizacji procedur SID i STAR w funkcji czasu i prędkości lotu oraz realizacji trajektorii proceduralnej. Wyniki przedstawiono jako obszary integracji w funkcji zmiennych decyzyjnych w formie wykresów i zależności matematycznych. Rezultat pracy ze względu na ilość dokonanych prób stanowi wkład w zagadnienie integracji przestrzeni powietrznej ponieważ dotychczas osiągi RPA przyjmowano na podstawie małej liczby znanych obiektów, a procedury modelowano w zakresie trajektorii bez obszarów tolerancji.

Zakres przedmiotowy rozprawy doktorskiej znalazł odzwierciedlenie w jej strukturze.

Praca doktorska ma charakter eksperymentalno – badawczy, z zastosowaniem metody porównawczej, została opracowana w siedmiu rozdziałach.

We **Wstępie** Doktorant zwięźle przedstawił uzasadnienie podjęcia tematyki badań i strukturę pracy doktorskiej. Ze względu na zastosowanie w dysertacji wielu specyficznych skrótów i oznaczeń ich wyjaśnienie zamieszczono w postaci spisu akronimów i spisu oznaczeń poprzedzających rozdział pierwszy. Doktorant opisał podstawowe zagadnienie badawcze i przedstawił identyfikację osiągow w locie grupy RPA i minimów operacyjnych integracji w przestrzeni jednolitej. Przyjął obowiązującą koncepcję integracji zorganizowaną w postaci dwóch dróg, tj. innowacyjnej oraz ewolucyjnej. Uwzględniając ramy czasowe, badania skupiono nad integracją RPA według reguł IFR. Osiągnięcie zakładanej koncepcji integracji wymaga jednak jeszcze wyjawienia luk z zakresu regulacji prawnych, technologii i akceptacji społecznej dotyczącej użycia RPA.

Problemem podjętym w pracy jest identyfikacja obwiedni charakterystyk operacyjnych RPA, oraz minimów operacyjnych spełniających wymagania integracji. Jako charakterystyki operacyjne przyjęte są osiągi samolotu w locie ustalonym i manewrach oraz wybrane cechy

konstrukcyjne płatowca (masy, obciążenia, wymiary, zespół napędowy). Obwiednia charakterystyk operacyjnych rozumiana jest jako zakres osiągnięć i cech konstrukcyjnych badanej grupy RPA, istotnych z punktu widzenia możliwości realizacji procedur SID i STAR. Minima operacyjne jest to granica wewnątrz obwiedni charakterystyk operacyjnych wskazująca minimalne warunki spełnienia wymagań integracji w procedurach SID i STAR. Jako spełnienie wymagań integracji RPA i załogowych statków powietrznych przyjęto realizację proceduralnej trajektorii lotu z minimalizacją wpływu na załogowy ruch lotniczy. Realizację proceduralnej trajektorii zdefiniowano poprzez zdolność RPA do lotu według zadanej procedury z punktu widzenia realizacji lotu samolotu bezzałogowego z ustalonymi warunkami. Minimalizację wpływu na załogowy ruch lotniczy zdefiniowano poprzez dopuszczalne zwiększenie czasu lotu RPA w procedurach SID i STAR względem samolotów załogowych z zachowaniem minimalnej separacji obiektów i minimów dla statków powietrznych kategorii A. Metodami badawczymi wykorzystanymi w pracy są eksperyment (symulacja), oraz metoda porównawcza (RPA względem lotnictwa załogowego). Badania prowadzone w pracy ukierunkowano na :

- rozszerzenie wiedzy z zakresu charakterystyk operacyjnych RPA,
- przedstawienie wytycznych projektowych, użytecznych dla organizacji projektujących architekturę przestrzeni powietrznej,
- opisanie RPA jako nowych użytkowników przestrzeni, użytecznych dla personelu lotniczego i ATM.

Dalszą część rozprawy doktorskiej opracowano w sposób następujący:

W Etapie koncepcyjnym w Rozdziałach 1 i 2 dokonano przeglądu literatury, opisano tło zagadnienia badawczego, przeprowadzono identyfikację problemu i luk badawczych, oraz opis badań związanych z tematem pracy.

Cel i metody badawcze zostały opisane w **Rozdziale 3** będącym wkładem twórczym Doktoranta którego dopełnieniem jest Zał. III przedstawiający cel pracy, tezy pracy i hipotezy badawcze badań wstępnych, uzasadnienie przyjętej metody badawczej Fast-Time Simulation. Doktorant omówił założenia modeli symulacyjnych, scenariuszy i kryteriów symulacji, dokonał oceny oraz opracowania środowiska symulacyjnego.

Rozdział 4. poświęcony został opracowaniu modelu charakterystyk geometrycznych i aerodynamicznych, zawiera opis modelu i cech konstrukcyjnych, osiągnięć i kształtowania trajektorii lotu, co stanowi także wkład twórczy Doktoranta przedstawiony w Zał. I.

Rozdział 5. zawiera przedstawienie procesu modelowania procedur referencyjnych Standard Instrument Departure i Standard Instrument Arrival, w tym: metody projektowania procedur,

statystykę istniejących procedur, oraz model procedur referencyjnych – syntezę źródeł i częściowy wkład twórczy.

W Etapie badawczym **w Rozdziale 6.** zawarto badania właściwe i analizę wyników opracowaną w formie wykresów, tabel i zależności matematycznych podzieloną na następujące etapy:

- wykonanie symulacji i gromadzenie rezultatów,
- oceny możliwości realizacji trajektorii proceduralnej,
- analizy integracji RPA wg. wpływu na załogowy ruch lotniczy,
- analizy integracji RPA wg. kategorii A.

W rozdziale zawarto także sposób realizacji symulacji FTS i przetwarzania uzyskiwanych wyników. Parametry symulacji lotu RPA przedstawiono na przykładzie standardowej procedury podejścia do lądowania. Rozdział ten jest zarazem głównym wkładem twórczym Doktoranta.

Rozdział 7. Wnioskowanie zawiera wnioski poznawcze i użytkarne dotyczące możliwości integracji RPA w przestrzeni kontrolowanej (na podst. szczegółowej analizy rezultatów symulacji), weryfikację tez pracy i hipotez badawczych, ocenę wypełnienia luk badawczych, opis problemów wynikłych podczas realizacji pracy oraz kierunki dalszych badań.

Praca zakończona jest podsumowaniem, syntezą oraz wnioskami końcowymi wynikającymi z zaproponowanego metodycznego podejścia do badanego zagadnienia i przeprowadzonej analizy literatury przedmiotu oraz zrealizowanego procesu badawczego.

Dysertację uzupełniono o zestawienia: spis literatury liczący 173 pozycje związane z tematem pracy, 27 tabel i 76 rysunków, oraz 4 załączniki i płytę CD zawierającą pliki dotyczące Środowiska symulacji FTS i kody źródłowe, Pracę doktorską w wersji elektronicznej oraz Statystyki procedur podejścia STAR - Exel.

Podjęty w pracy doktorskiej obszar badań dotyczył osiągow operacyjnych RPA spełniających wymagania integracji decydujących o bezpieczeństwie realizacji zadań we wspólnym segmencie przestrzeni powietrznej. Doktorant słusznie zauważył i przyjął, iż aby zrozumieć problemy integracji systemu należy je najpierw zmierzyć, porównać i ocenić, co stanowiło podstawę do dalszych działań operacyjnych.

Przyjęty i opisany w pracy cel i problem badawczy oraz główna hipoteza badawcza dotycząca identyfikacji obwiedni charakterystyk operacyjnych RPA oraz minimów operacyjnych spełniających wymagania integracji, zostały zrealizowane. Jako charakterystyki operacyjne przyjęto: osiągi samolotu w locie ustalonym i manewrach, wybrano cechy

konstrukcyjne płatowca oraz osiągi silnika. Obwiednia charakterystyk operacyjnych rozumiana jest jako zakres osiągnięć i cech konstrukcyjnych badanej grupy RPA, istotnych z punktu widzenia możliwości realizacji procedur SID i STAR, natomiast granica wewnątrz obwiedni charakterystyk operacyjnych określa minimalne warunki spełnienia wymagań integracji w procedurach SID i STAR. Jako spełnienie wymagań integracji przyjęto realizację proceduralnej trajektorii lotu RPA z minimalnym wpływem na ruch lotniczy załogowych statków powietrznych. Tym samym cele pracy zostały zrealizowane. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż wyniki badań i analiz ujęto w formie rysunków, tabel, diagramów i wykresów przedstawionych w sposób metodyczny, czytelny i zrozumiały, będących opracowaniem własnym Autora pracy.

Praca doktorska mgr inż. Daniela Lichonia stanowi badawcze - analityczno - metodyczne i opisowe opracowanie systemu kompleksowego podejścia z wykorzystaniem analizy systemowej do optymalizacji wybranych zagadnień konstrukcji RPA oraz budowy procedur SID i STAR. Jest nowoczesnym kierunkiem badań przedstawionym przez Doktoranta, może stanowić podstawę do opracowania pomocy dydaktycznych dla słuchaczy kierunków lotniczych uczelni politechnicznych. Przeprowadzone przez Doktoranta badania w pełni potwierdzają tezę pracy doktorskiej a ponadto wyznaczają nowe kierunki badań.

Na uznanie zasługują walory tematyki zaprezentowanej w pracy doktorskiej uwzględniające opracowanie zgodnie z koncepcją rozwoju i wykorzystania przestrzeni powietrznej w programie Unii Europejskiej SESAR, w który wpisuje się jeden z wiodących celów działalności Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej w zakresie bezzałogowych statków powietrznych, jakim są działania wspierające tworzenie w Polsce przyjaznego środowiska dla dalszego rozwoju rynku usług BSP, a tym samym realizacja koncepcji U-space, zakładającej bezpieczną i efektywną integrację lotnictwa załogowego i bezzałogowego.

3. Uwagi

W trakcie czytania pracy dostrzeżono drobne nieścisłości, błędy językowe i literowe, co **w żadnym stopniu** nie umniejsza merytorycznej wartości wyników osiągniętych przez Doktoranta. Wszystkie uwagi i wątpliwości zostały omówione, wyjaśnione, zaakceptowane oraz uwzględnione przez Doktoranta. W celu wykazania użyteczności pracy doktorskiej, poproszono Doktoranta o udzielenie odpowiedzi na następujące pytania:

1. Czy opracowany model osiągnięć samolotów bezzałogowych jest reprezentatywny

względem zróżnicowanych układów konstrukcyjnych

(np. układ kaczka lub trójpłaszczyznowy)?

2. W jakim stopniu metoda badawcza Fast-Time Simulations może znaleźć zastosowanie w nowych rozwiązaniach w zarządzaniu ruchem lotniczym?
3. Jakie główne czynniki aerodynamiczne i konstrukcyjne wpływają na różnice w osiąгах w locie między samolotami bezzałogowymi a załogowymi?

4. Podsumowanie

Doktorant dokonał szczegółowej analizy literatury przedmiotu i na podstawie własnych doświadczeń, badań i analiz sformułował w swojej pracy podstawowe zagadnienie badawcze, czyli dokonał identyfikacji osiągow w locie grupy RPA i minimów operacyjnych integracji w wybranych elementach jednolitej przestrzeni powietrznej. Koncepcja integracji zorganizowana została w postaci dwóch dróg, tj. innowacyjnej oraz ewolucyjnej. Droga innowacyjna dotyczy opracowania nowych elementów ATM (Air Traffic Management), tj. reguł umożliwiających operowanie RPA na bardzo małych i dużych wysokościach. Droga ewolucyjna dotyczy dostosowania RPA do istniejących reguł wykonywania lotów z widocznością ziemi lub według wskazań przyrządów nawigacyjnych (Visual/Instrument Flight Rules, VFR/IFR), której słuszność w pełni została potwierdzona przeprowadzonymi badaniami i analizą literatury przedmiotu, oraz opracowaniami graficznymi. Przeprowadzone przez Doktoranta analizy i badania świadczą o Jego dużych umiejętnościach w prowadzeniu badań na wysokim poziomie naukowym, zaś wnioski końcowe pracy wskazują na nowe kierunki badań służące wykorzystaniu analizy systemowej do optymalizacji wybranych zagadnień konstrukcji RPA oraz wybranych elementów architektury przestrzeni powietrznej.

Reasumując, uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Daniela LICHONIA pt.: "Identyfikacja charakterystyk operacyjnych nieautonomicznych powietrznych statków bezzałogowych dla potrzeb wykonywania lotów w przestrzeni kontrolowanej" spełnia warunki określone w art. 179, ust. 1. „Ustawa z dnia 3.07.2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669).

Jednocześnie uważam osiągnięcia zaprezentowane w rozprawie doktorskiej za ważne do zastosowania w praktyce, co pozwoli na optymalne planowanie rozwoju i modelowanie konstrukcji RPA oraz wybranych elementów przestrzeni powietrznej. Praca stanowi kompendium wiedzy nowoczesnego modelowania w na bazie wykorzystania analizy systemowej, będącej odpowiednim narzędziem do tego typu rozwiązań. Rozwiązane przez Doktoranta problemy teoretyczne potwierdzone badaniami i analizami nadają recenzowanej pracy wybitny charakter poznawczy i użyteczny z dużym potencjałem rozwojowym.

W związku z powyższym, stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie mgr inż. Daniela LICHONIA do jej publicznej obrony.



Leszek CWOJDZIŃSKI

dr hab. inż. pil.