

Dr hab. inż. Cezary SZCZEPAŃSKI

Profesor Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Grzegorza DRUPKI**  
**p.t. „WYZNACZANIE TRASY PRZELOTU SAMOLOTÓW W**  
**PRZESTRZENI POWIETRZNEJ ZE SWOBODĄ PLANOWANIA**  
**TRAS PODCZAS EKSPLOATACJI W WARUNKACH**  
**NIEPEWNOŚCI”**

Recenzję sporządzono na podstawie pisma R-530-21-03/19/2021 z dnia 14.07.2021 od Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Rzeszowskiej.

**Treść pracy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Grzegorza Dрупki pod tytułem „Wyznaczanie trasy przelotu samolotów w przestrzeni powietrznej ze swobodą planowania tras podczas eksploatacji w warunkach niepewności” zawiera osiem rozdziałów, streszczenie oraz wykaz literatury. Przedstawiona została na 151 stronach, zaś wykaz zacytowanej literatury liczy 73 pozycje.

Rozdział 1 „Wstęp”, zawiera krótkie omówienie tematyki pracy, które obejmuje dwa obszary:

- Wprowadzenie w stan prawny obowiązujący w Europie w odniesieniu do organizacji ruchu lotniczego w przestrzeni powietrznej oraz instytucji i środków zapewniających jego bezpieczeństwo,
- Opracowaną metodę planowania najlepszej trasy przelotu samolotu według zasady Full FRA (Full Free Route Airspace).



W dalszej części rozdziału znajduje się teza pracy oraz uzasadnienie podjęcia się przez Autora realizacji tego tematu, a także skrótowe omówienie zalet proponowanej metody wyznaczania trasy przelotu i celu pracy.

Tezę pracy sformułowano w postaci: „możliwe jest wyznaczenie trasy przelotu statków powietrznych pozwalające na bardziej efektywną niż obecnie eksploatację, z uwzględnieniem warunków niepewności”.

Część końcowa rozdziału zawiera sformułowanie celu pracy: „opracowanie metody usprawniającej eksploatację statku powietrznego na etapie planowania lotu przez automatyzację procesu planowania trasy przy uwzględnieniu czynników zewnętrznych oraz jej weryfikacja” oraz jego zwarty opis.

Rozdział 2, zatytułowany „Zmiany w procesie zarządzania ruchem lotniczym” rozpoczyna wprowadzenie do zagadnień koordynacji i procesu kierowania ruchem lotniczym w Europie. Następnie opisano szczegółowo zadania i funkcje poszczególnych uczestników tego procesu. Wyjaśniono tu koncepcję sposobu użytkowania przestrzeni powietrznej FUA – Flexible Use of Airspace – będącą podstawą do dalszych rozważań w pracy.

Rozdział 3, zatytułowany „Planowanie lotu”, poświęcony został przeglądowi procesu opracowywania i zgłaszania planów lotu różnych typów, ze szczególnym uwzględnieniem planów lotu bazujących wyłącznie na punktach zwrotnych WPT, jako metody wyłącznie stosowanej w pracy. Opisane zostały poszczególne kroki procedur opracowania i zgłaszania planów lotu. Przedstawiono także zalety i wady opisanych sposobów w aspekcie ich niedogodności i problemów z nimi związanych, jakie mogą być rozwiązane przez proponowaną w pracy metodę.

W rozdziale 4, zgodnie z jego tytułem „Wybór trasy przelotu”, Autor przedstawia obszerny przegląd czynników warunkujących wybór trasy lotu, a także sposobów ich uwzględnienia w całym procesie planowania przelotu. Opisuje tu szczegółowo, zgodnie z nomenklaturą IATA, wszystkie fazy lotu, w tym przelot, którego podfazą „Lot z prędkością przelotową” będzie się zajmował w ocenianej pracy. Wiąże się to ze stwierdzeniem Autora, że uwzględnienie wszystkich wymienionych faz lotu w jednej metodzie zautomatyzowanego planowania lotu byłoby zagadnieniem bardzo złożonym i obszernym. Dalszą część rozdziału zajmuje opis struktury przestrzeni powietrznej, z zaznaczeniem których jej elementów dotyczy proponowane w pracy rozwiązanie oraz czynników organizacyjnych i pogodowych wpływających na organizację lotu. Opis warunków pogodowych stanowi istotną część tego fragmentu pracy. Szczegółowa

analiza kolejnych czynników branych pod uwagę w opracowanej metodzie kosztu usług nawigacyjnych i parametrów eksploatacyjnych statku powietrznego stanowi końcową część tego rozdziału. Na jego końcu umieszczone jest krótkie podsumowanie warunków niepewności wpływających na wybór trasy lotu, które będą uwzględniane w ocenianej pracy.

Zawartość Rozdziału 5 „Algorytmy automatycznego poszukiwania trasy” jest zgodna z jego tytułem. Rozwiązanie problemu poszukiwania najkrótszej drogi podzielił Doktorant na trzy warianty:

- poszukiwanie ścieżki z jednym wierzchołkiem docelowym,
- poszukiwanie ścieżki między parą wierzchołków,
- poszukiwanie ścieżki między wszystkimi parami wierzchołków.

Autor omówił tu szczegółowo zalety i wady poszczególnych algorytmów wyszukiwania najkrótszych połączeń pomiędzy węzłami grafu. Przeprowadził ich analizę pod kątem przydatności do wyznaczenia najkrótszej drogi pomiędzy wybranymi lotniskami uwzględniającej ograniczenia. Rozdział zakończył wyborem najlepszego algorytmu (Floyda-Warshalla) i uzasadnieniem tego wyboru.

Rozdział 6 zatytułowany „Automatyczne wyznaczanie trasy przelotu” jest kluczowym, z punktu widzenia celu pracy, rozdziałem. Doktorant rozpoczyna go od wyliczenia kroków gwarantujących automatyzację wyznaczania trasy lotu według opracowanej przez niego metody oraz skróտowego jej omówienia. Następnie, przechodzi do szczegółowego opisu metody automatycznego wyznaczania trasy lotu. Rezultatem zastosowania tej metody jest plan lotu zgodny z wymaganiami obowiązującymi dla lotów wykonywanych w europejskiej przestrzeni kontrolowanej. Trasa lotu wyznaczano za pomocą tej metody będzie lepsza niż trasa o najmniejszej długości wynikająca z mapy nawigacyjnej, z powodu uwzględnienia ograniczeń i wykluczeni istniejących w danym okresie w tym obszarze. Kryteria poszukiwania i "optymalizacji" tras mogą być wybierane przez użytkownika metody spośród dwu kategorii: liczbowej i lingwistycznej. Mogą być one dowolnie łączone w poszczególnych krokach, za pomocą techniki TOPSIS, opisaney w dalszej części rozdziału. Wykorzystywana jest do tego celu wielowymiarowa macierz decyzyjna budowana dla określonych punktów początkowego i końcowego trasy oraz wybranych kryteriów jej "kosztu".

Rozdział 7, zgodnie ze swoim tytułem „Weryfikacja przedstawionej metody automatycznego wyznaczania tras przelotu” Doktorant poświęcił opisowi prac

związanych z wykazaniem skuteczności zaproponowanej metody wyznaczania tras przelotów. Rozdział rozpoczął opisem celu i sposobów weryfikacji opracowanej przez niego metody. Następnie wybrał do testów dwa typy samolotów A-320 i B-737-700, których dane zebrał w tabeli oraz scenariusz sytuacji powietrznej w przestrzeni typu Full Free Route Airspace. W przestrzeni tej znajdują się wszystkie elementy i ograniczenia uwzględniane przez zaproponowaną metodę wyznaczania tras przelotów, tj. zróżnicowane warunki atmosferyczne (wiatr, turbulencje, burze), obszary wyłączenia przestrzeni z ruchu (TRA/TSA). A także stawki opłat za przelot przez poszczególne fragmenty trasy.

Uzyskane wyniki jednoznacznie pokazują skuteczność opracowanej przez Doktoranta metody wyznaczania tras przelotów, uwzględniających różnorakie ograniczenia i niepewności. Stwarza ona możliwość nie tylko opracowania planu lotu, ale także jego zmiany w trakcie przelotu, ze względu na zmianę warunków lub ograniczeń. Daje ona możliwości kontrolerom ruchu lotniczego lub operatorom statków powietrznych na szybki wybór trasy najlepszej pod względem ważnych dla nich parametrów.

W Rozdziale 8 „Podsumowanie” Autor przedstawił także szereg wniosków wynikających z przeprowadzonych badań, a związanych z praktyczną realizacją zaproponowanej metody. Omówił znikomy wpływ gęstości punktów węzłowych na czas obliczeń, ale za to istotny wpływ liczby tych punktów na ten czas. W każdym jednak przypadku czas takiego wyznaczenia najlepszej trasy będzie znacznie krótszy niż obliczenia prowadzone dotychczasowymi metodami – ręcznego przeliczania kolejnych wariantów trasy przelotu.

Ponadto, podsumował uzyskane wyniki w świetle zakładanych celów pracy, przy uwzględnieniu rzeczywistych uwarunkowań pracy służb kontroli ruchu lotniczego, w tym wpływu turbulencji na statek powietrzny i sam przelot. Przedstawił także planowane kierunki przyszłych badań wynikające z osiągniętych wyników ocenianej pracy.

### **Wartość merytoryczna rozprawy**

Przedstawiona mi do oceny rozprawa stanowi istotny wkład w praktykę codziennej realizacji zadań związanych z planowaniem i wykonywaniem lotów w kontrolowanej przestrzeni powietrznej. Opracowana przez Doktoranta metoda automatycznego generowania planów lotów, uwzględniająca szereg ograniczeń takich, jak np. wyłączenia stałe lub czasowe stref z użytkowania lotniczego oraz niepewności np.

zmieniających się stref turbulencji, zmiennej pogody, w tym siły i kierunku wiatru, a także biorąca pod uwagę kilka kryteriów optymalizacyjnych, jak np. koszt całkowity operacji powietrznej, czas przelotu czy też koszt paliwa, stanowi nowość na skalę europejską. Zastosowane w niej metody oceny liczbowe połączone z lingwistycznymi, stanowią o jej skuteczności oraz nowości. Dzięki zastosowanym algorytmom i zmodyfikowanym przez Autora metodom analizy i wnioskowania, opracowana metoda automatycznego generowania planów lotów jest w pełni przydatna do przygotowywania takich planów dla lotów krótkich trwających do 1,5 godziny.

### **Poprawność redakcyjna rozprawy**

Oceniana rozprawa ma niski poziom redakcyjny. Zawiera liczne błędy gramatyczne, logiczne i literowe, niekiedy uniemożliwiające jednoznaczne zrozumienie myśli Autora. Przykład takiego błędu to na stronie 99 powołanie się na zależności (36) i (37) zamiast na (35) i (36). Przykłady błędów literowych to na stronie 102: wiersz 3 od góry "czas" zamiast "czasu", wiersz 5 od góry "we" zamiast "w", na stronie 104 "Data processing steps" zamiast śródtytułu w języku polskim tak, jak cały tekst. Przykłady błędów logicznych to odwołanie się na stronie 126 do "poniższej formuły (44)", która znajduje się na stronie 103 oraz sformułowanie "lepszą optymalizację w stosunku do nieprzewidywanych zmian pogodowych" w podsumowaniu na stronie 143. Kluczowy dla uzasadnienia uzyskanych wyników rysunek 56 na stronie 114 ma nieczytelne oznaczenia wygenerowanych tras lotu. Ponadto Autor niekonsekwentnie używa pojęcia macierz, które w niektórych fragmentach pracy zastępuje spolszczonym pojęciem angielskim "matryca", np. na stronie 109 "matryca decyzyjna" czy wcześniej "matryca Floyda-Warshalla" na stronach 92 i 93.

### **Uwagi i pytania**

Moje uwagi i wątpliwości wynikają przede wszystkim z niestarannej redakcji przedstawionego do oceny tekstu. Jednak niektóre sformułowania świadczą o ich niezrozumieniu przez Doktoranta. I tak, pojęcie "alternatywa" odnosi się do wyboru jednej z dwu możliwości, podczas gdy Autor wielokrotnie w tekście rozprawy traktuje je jako synonim słów "możliwość" lub "opcja", np. na stronie 107 "korzystne alternatywy trajektorii", stronie 128 "dla pozostałych alternatywnych tras", stronie 129 "Najlepszą z dostępnych alternatyw", "dla alternatywnych tras" odnośnie co najmniej 7 wyznaczanych tras lotu. Podobnie traktuje słowo "balans" jako synonim pojęcia

"równowaga", np. na stronie 145. Na stronie 119 pojawia się to słowo w zdaniu "W tym przypadku, balansowanie odbywa się pomiędzy zależnością, że wraz ze wzrostem czasu przelotu wzrasta zużycie paliwa, jednocześnie opłata nawigacyjna nie jest ściśle związana z minimalnym czasem przelotu przez określony obszar.", którego sens jest niezrozumiały.

Pytania dotyczące sformułowań użytych w treści pracy:

1. Co Autor miał na myśli pisząc na stronie 68 "właściwie zorganizowany zapis obliczeniowy"?
2. Czy w opisie oznaczeń zmiennych w zależności (37) zbiór wartości atrybutów lingwistycznych to  $V$  czy  $v$  – tak jak to opisał Autor?
3. Na stronie 109 pojawia się stwierdzenie "dystans w odniesieniu do układu współrzędnych"; o jaki dystans tu chodzi?
4. Na stronie 110 mamy rozważania dotyczące zużycia paliwa. Przyjęto je na poziomie przeciętnym 2500kg/h, zaś w litrach 1800l/h. Według tych danych litr paliwa waży około 1,39kg, a nie 0,8kg jak to podał Autor dwa wiersze niżej. Które dane są więc prawidłowe i zostały przyjęte do badań?
5. O co chodzi Autorowi w zdaniu ze strony 121 "Ponieważ trudno jest ocenić w jakim stopniu turbulencje negatywnie oddziałują na komfort podróżowania, jeżeli uwzględniany jest stosunek intensywności do czasu oddziaływania, teoria zbiorów rozmytych pozwala na sprawniejszą i zautomatyzowaną interpretację turbulencji."?
6. Na stronie 123 pojawia się stwierdzenie "brak przecięć wykresu trapezoidalnego i trójkątnego (rys 59)", na którym to rysunku nie ma takich wykresów. Co Autor miał na myśli?
7. Co Autor rozumie pod pojęciem "sprawna obronność państwa" zastosowanym na stronie 133?
8. Co Autor rozumie pod pojęciem "zwiększenie precyzji czasu przelotu" zastosowanym na stronie 144?

Ponadto pytanie ogólniejszej natury: czy Doktorant brał udział w opracowaniu dokumentów zacytowanych w wykazie literatury pod pozycjami [72] i [73]?

Uwaga końcowa: wprowadzenie wykazu stosowanych w pracy oznaczeń, szczególnie akronimów związanych z przepisami dotyczącymi kierowania ruchem lotniczym, byłoby dużym ułatwieniem w czytaniu z pełnym zrozumieniem rozprawy.

### **Ocena końcowa rozprawy**

W tym miejscu należy stwierdzić, że Autor zrealizował w całym zakresie założenia badawcze osiągając planowane cele naukowe. W sposób właściwy zaplanował i zrealizował badania eksperymentalne opracowanej przez siebie metody zautomatyzowanego planowania tras przelotów, o nowatorskim charakterze. Potrafił zaproponować skuteczne rozwiązania problemów związanych z uwzględnieniem różnych ograniczeń i niepewności podczas realizacji takiego zadania. Potwierdził te propozycje badaniami w warunkach lotów w symulowanej przestrzeni powietrznej. Stworzył efektywne narzędzie do wspierania pracy pilotów, kontrolerów ruchu powietrznego oraz operatorów sprzętu lotniczego.

Autor przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej wykazał się wszechstronnością i głęboką wiedzą związaną z jej tematyką. Przedstawił szereg dogłębnych analiz przyczyn zjawisk, z jakimi spotkał się podczas realizacji pracy. Pokazał zdolność rozpatrywania ich z różnych punktów widzenia, tworząc ich spójne modele i formułując prawidłowe wnioski.

Podsumowując, oceniam poziom przedstawionej mi do oceny rozprawy doktorskiej jako spełniającego wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi. Autor wykazał się umiejętnością formułowania celu naukowego badań oraz znajomością metodyki prowadzenia badań naukowych, popartą znajomością wiedzy w obszarach objętych przedstawioną rozprawą.

Wniosuję o dopuszczenie mgr inż. Grzegorza Drupki do publicznej obrony przedstawionej mi pracy jako rozprawy doktorskiej.



Dr hab. inż. Cezary Szczepański

Profesor Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Lotnictwa

