

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Adriana PAWEŁKA pod tytułem „Optymalizacja procesu sekwencjonowania ruchu lotniczego”**

### **1 TEMATYKA ROZPRAWY**

Rozprawa doktorska mgr inż. Adriana Pawełka pod tytułem „Optymalizacja procesu sekwencjonowania ruchu lotniczego” została wykonana na podstawie decyzji Rady Naukowej Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 2 marca 2022.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa zawiera pięć rozdziałów, wykazy: oznaczeń, rysunków, tabel, bibliografię oraz cztery załączniki. Zawarta została łącznie na 181 stronach, zaś wykaz wykorzystanych źródeł zawiera 147 pozycji.

W pracy autor poruszył zagadnienia coraz częściej pojawiające się w odniesieniu do planowania ruchu samolotów, w szczególności ruchu samolotów przylatujących do lotniska przeznaczenia, w taki sposób aby przy zachowaniu wymaganych między nimi separacji czasowych zachować możliwie najmniejszą różnicę między zakładanym, a rzeczywistym czasem przylotu, jednocześnie minimalizując niekorzystny wpływ ich ruchu na środowisko naturalne (np. uwzględnione w rozprawie zużycia paliwa). Poruszana w pracy tematyka jest ciekawa, do niedawna z różnych przyczyn nie znajdowała się w głównym nurcie badań i aplikacji związanych z lotnictwem. Obecnie ogólny wzrost liczby lotów skutkujący większym zagęszczeniem ruchu samolotów szczególnie w rejonach lotnisk jest impulsem wyzwalającym nowe działania, również badania naukowe w tym obszarze. Programy takie jak SESAR, Clean Sky, Clean Aviation coraz częściej obok rozwiązań czysto technicznych skupiają się na planowaniu i sposobach organizacji ruchu lotniczego w celu zwiększenia jego efektywności, poziomu bezpieczeństwa i zmniejszeniu jego niekorzystnego wpływu na środowisko naturalne. W związku z powyższym, jednym z celów postawionych przed realizowanymi w wymienionych i innych programach badawczych projektami, jest opracowanie narzędzi i metod pozwalających, zachowując wymogi bezpieczeństwa,

utrzymać założony/zaplanowany rozkład lotów oraz zminimalizować negatywny wpływ ruchu samolotów na środowisko naturalne.

Przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska swoją tematyką wpisuje się w nurty badawcze z tych obszarów w Polsce, Europie i na świecie. Podjęte w pracy badania nie dają odpowiedzi na wszystkie pytania związane z modelowaniem ruchu lotniczego (w przypadku pracy modelowaniem separacji czasowych między przylatującymi samolotami) czy sposobem sekwencjonowania (kolejności ułożenia przylotów), jednak zaproponowane przez Doktoranta rozwiązania mogą być korzystną i ciekawą propozycją dla analityków, projektantów lub użytkowników systemów analizujących, nadzorujących, planujących ruch lotniczy.

## 2 CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

W pierwszym rozdziale zatytułowanym „Wprowadzenie”, na podstawie przeglądu literatury, w tym aktów prawnych regulujących zasady na jakich odbywa się ruch samolotów dolatujących do lotniska docelowego, przedstawiono genezę badanego problemu sygnalizując powody, dla których należy rozwijać metody wspomagające organizację ruchu lotniczego. Należy zwrócić uwagę, że już w tym miejscu Autor wskazuje potrzebę opisu zjawisk związanych z organizacją ruchu samolotów za pomocą formalizmów i funkcji matematycznych, aby móc je wykorzystać w definiowaniu zagadnienia optymalizacji i modelowania, co konsekwentnie realizował w następnych częściach pracy.

W tym rozdziale Doktorant przedstawił także cel pracy:

„Celem niniejszej pracy było opracowanie nowego podejścia, umożliwiającego usprawnienie procesu kontroli przychodzącego ruchu lotniczego w strefach kontrolowanych lotniska na wszystkich etapach planowania, które w rezultacie skutkować będzie optymalizacją procesu sekwencjonowania ruchu lotniczego.”

jej tezę

„ ... możliwe jest zbudowanie generycznego modelu separacji oraz optymalizacja separacji ruchu przychodzącego przy wykorzystaniu danych o przeszłym ruchu lotniczym.”

Autor rozprawy bazując na danych literaturowych, wynikach swoich wcześniejszych prac, wynikach prac prowadzonych na Politechnice Warszawskiej i innych ośrodkach naukowych sformułował, dwa podstawowe cele badań :

- Opracowanie modelu ruchu lotniczego przy użyciu rozkładu prawdopodobieństwa.
- Opracowanie sposobu sekwencjonowania ruchu lotniczego z wykorzystaniem koncepcji CDO (Continuous Descent Operations) oraz RTA (Required Time of Arrival).

Niniejszy rozdział w pewien sposób sugeruje, że wymienione wyżej dwa zadania będą w dalszej części pracy połączone w jedno pełne rozwiązanie i opracowany model separacji czasowych zostanie wykorzystany do optymalizacji planu ruchu lotniczego (w pracy jest to sekwencjonowanie przylotów). Niestety nie zostało to ostatecznie zrealizowane w ramach opiniowanej rozprawy.

W tym bardzo obszernym, niemal pięćdziesięciostronicowym rozdziale umieszczone zostały również opisy innych czynników pośrednio i bezpośrednio wpływających na organizację i planowanie ruchu samolotów takich jak: obecny stan techniki, podejście do zagadnienia automatyzacji organizacji ruchu. Umieszczone opisy incydentów i wypadków lotniczych obrazują przykładowe skutki błędów popełnianych w tym obszarze.

Rozdział 2 zatytułowany „Wyznaczenie separacji czasowych”, Autor rozpoczyna od pobieżnego wprowadzenia w zagadnienie budowy modelu matematycznego dynamiki ruchu samolotu. Następnie, szczegółowo przedstawia zagadnienie utrzymania separacji między samolotami nawiązując do regulacji prawnych w tym zakresie, procedury postępowania oraz rozwiązania techniczne pozwalające efektywnie monitorować i utrzymywać odległości między samolotami.

Kolejne części tego rozdziału zostały poświęcone odpowiednio: przedstawieniu, które informacje o lotniskach i w jaki sposób będą wykorzystywane w opisywanych badaniach oraz jaką drogą pozyskane zostały do badań dane dotyczące ruchu lotniczego. W końcowej części rozdziału Autor wprowadza zapisy matematyczne pojęć wykorzystanych w kolejnych rozdziałach.

Rozdział 3, zgodnie ze swoim tytułem „Identyfikacja uogólnionego modelu separacji czasowych w przychodzącym ruchu lotniczym”, skupia się na opracowaniu modeli separacji czasowych między samolotami dolatującymi do lotniska przeznaczenia. Jest to jeden z dwóch kluczowych rozdziałów będących sednem pracy. Autor omawia szczegółowo elementy i fazy budowy modeli bazujących na rachunku prawdopodobieństwa. Zaczyna od wyboru modelu rozkładu prawdopodobieństwa, po czym identyfikuje parametry wybranego rozkładu dla pojedynczego dnia przylotów rozszerzając następnie model na jedno wybrane lotnisko, aby ostatecznie dojść do postaci uogólnionego modelu separacji czasowych zależnego jedynie od ilości przylotów w danym dniu.

Rozdział trzeci kończy ocena jakości opracowanego modelu. W tym celu wyniki uzyskane dla modelu uogólnionego zostały zestawione z danymi rzeczywistymi dla wybranych lotnisk.

Rozdział 4 „Optymalne sekwencjonowanie ruchu lotniczego” jest to drugi kluczowy rozdział rozprawy. Został on poświęcony metodzie optymalizacji czasów przylotów. W podrozdziale 4.1 Doktorant wprowadza zapis matematyczny pojęć używanych następnie do implementacji wybranej metody. Rozdział 4.2 zawiera ciekawe i „sprytnie” podejście do zagadnienia linearyzacji równań więzów i funkcji kosztów. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono założenia i samą metodę optymalizacji wykorzystaną do rozwiązania postawionego zadania. W rozdziale 4.5 przedstawiono przykładowe rozwiązanie i otrzymane wyniki.

Rozdział 5, to „Podsumowanie”. Doktorant rzetelnie podsumowuje swoje osiągnięcia prezentując mocne i słabe strony modelu oraz wybranego sposobu sekwencjonowania ruchu samolotów. Nakreśla również perspektywy dalszego rozwoju i możliwość praktycznej implementacji.

### **3 PRZYJĘTA METODYKABADAŃ**

Zastosowana przez doktoranta metodyka badań jest typową dla prac skupiających się na analizie danych, modelowaniu systemów czy też zagadnieniach optymalizacji. Obejmuje kolejno etapy: wyboru narzędzi, przygotowania danych, budowy modeli i weryfikacji ich działania w końcowym etapie badań.

Zastosowana metodyka jest według mnie wystarczająca dla prawidłowego przeprowadzenia opisanych w pracy badań i pozwala na wykonanie wszystkich niezbędnych działań zmierzających do realizacji celu pracy i udowodnienia postawionej tezy.

Pod względem merytorycznym praca jest przygotowana prawidłowo zawiera wszystkie niezbędne elementy: ogólne omówienie tematu, sformułowanie problemu badawczego, opis warsztatu badawczego, właściwe obliczenia i analizy, weryfikację otrzymanych wyników i dyskusję na ich temat.

### **4 WYNIKI BADAŃ**

Jak już wspomniano wcześniej, rozprawa doktorska pana mgr. inż. Adriana Pawełka dotyka coraz bardziej aktualnego tematu organizacji i planowania ruchu lotniczego. Sama w sobie koncentruje się na ruchu samolotów dolatujących do lotniska docelowego. Obejmuje stosunkowo wąski zakres tematyczny skupiając się na utrzymaniu właściwych separacji czasowych między kolejnymi samolotami. Praca nieformalnie składa się z dwóch części badawczych, w których zrealizowano dwa niezależne, cząstkowe cele naukowe :

1. Budowę modelu separacji czasowych między samolotami przylatującymi do lotniska docelowego.
2. Sformułowanie w sposób matematyczny problemu, którego rozwiązanie pozwala na zaplanowanie ruchu lotniczego, tak aby utrzymać wymagane separacje czasowe w wybranym punkcie, zapewnić zakładany czas przylotu i zminimalizować zużycie paliwa (dodatkowe kryterium przyjęte w pracy).

Wyniki otrzymane w trakcie realizacji powyższych celów cząstkowych uznaję za najważniejsze dokonania naukowe Doktoranta. Ponadto, należy podkreślić, że zrealizowane badania mają swój wymiar aplikacyjny. Opracowany model separacji czasowych może być wykorzystywany w pracach związanych z modelowaniem i analizą ruchu samolotów dolatujących do wybranego punktu nawigacyjnego. Natomiast opracowany zapis matematyczny problemu może być wykorzystany bezpośrednio w procesie optymalizacji struktury przylotów lub stanowić przykład, być wskazówką jak można przeprowadzić opis matematyczny zagadnienia w przypadku innych zadań optymalizacyjnych. Opracowana metoda może być narzędziem wspomagającym planowanie, organizację ruchu nie tylko samolotów przylatujących do lotniska przeznaczenia, ale na całej trasie przelotu lub nawet w pełnej siatce połączeń.

Realizując wskazane wyżej cele doktorant w bardzo przemyślany i trafny sposób wykorzystał podstawowe narzędzia rachunku prawdopodobieństwa oraz statystyki do modelowania i analizy zagadnienia z dziedziny organizacji i planowania ruchu lotniczego. Wprowadzone i wykorzystane przez autora zapisy formalne, swobodne poruszanie się w obszarach rachunku prawdopodobieństwa, optymalizacji i organizacji ruchu lotniczego wskazują na zrozumienie istoty poruszanych w pracy zagadnień.

W tym miejscu należy zaznaczyć, że niewątpliwie jednym z kluczowych osiągnięć Doktoranta zaprezentowanych w recenzowanej pracy jest opis i modelowanie zagadnień organizacji i planowania ruchu lotniczego za pomocą pojęć matematycznych, ze szczególnym uwzględnieniem pojęć z zakresu rachunku prawdopodobieństwa. Należy zwrócić uwagę, że bardzo często podstawowe, powszechnie rozumiane pojęcia są trudne, lub przynajmniej nie są intuicyjne do formalnego opisu matematycznego. W pracy przedstawiono matematyczne zapisy takich pojęć jak na przykład przedziały kierunków dla pasów startowych (równania 2.10 do 2.14), czasy przelotu przez punkt nawigacyjny wyznaczane na podstawie posiadanych rzeczywistych danych (równania 2.18 do 2.20), filtracja z pomocą okna czasowego (równania 2.21 i 2.22) i szereg innych. W tym miejscu należy podkreślić, że Doktorant bardzo sprawnie, wykorzystując nietypowe narzędzia, posługuje się zapisem matematycznym do opisu rzeczywistości (np. równania 4.4 do 4.12, w których wprowadza zmienne  $L$  i  $B$  do aktywacji i dezaktywacji poszczególnych równań wyjściowego układu równań).

W rozdziale trzecim budując krok po kroku uogólniony model separacji czasowych Doktorant sformułował i rozwiązał kilka ciekawych zadań cząstkowych. Ich wyniki są interesujące i mogą być przyczyną do dalszej dyskusji. Na przykład, jednym z kroków w przygotowania wspomnianego ogólnego modelu separacji czasowych było, opracowanie modelu separacji czasowych dla pojedynczego dnia przylotów (rozd. 3.2.4). Interesującym wynikiem prac Doktoranta jest zamieszczone w Tabeli 3.1 zestawienie pokazujące dopasowanie wybranego wcześniej rozkładu Cauch'ego prawdopodobieństwa, dla którego Doktorant zidentyfikował parametry, do rozkładu rzeczywistych separacji czasowych w dniach przylotów dla analizowanych lotnisk. W mojej opinii jest to wartościowy punkt pracy, dający czytelnikowi wskazówkę w jaki sposób można zbudować model matematyczny opisujący separacje czasowe między samolotami przylatującymi do lotniska docelowego.

Ostatecznie w wyniku prac przedstawionych w rozdziale trzecim Doktorant zbudował uogólniony model separacji czasowych - równanie 3.48 - po czym za pomocą wskaźników wymienionych w rozdziałach 3.3.2 i 3.3.3 zbadał jakość jego dopasowania do rzeczywistych danych. W tym momencie nasuwa się pytanie czy zidentyfikowana w niektórych przypadkach jakość dopasowania na poziomie 0.3 powinna być rzeczywiście uznawana za zadawalającą?

Rozdział czwarty poświęcony jest rozwiązaniu drugiego z wymienionych celów cząstkowych pracy. W tej części rozprawy pan Adrian Pawełek kilkakrotnie udowodnił swoją wiedzę z zakresu definiowania zagadnień optymalizacyjnych oraz umiejętności wykorzystania różnych narzędzi matematycznych do ich opisu. W rozdziale 4.1 autor wybiera kryterium optymalizacji. Następnie w rozdziale 4.2 za pomocą trafnie

i „sprytnie” wybranego aparatu matematycznego dokonuje linearyzacji równania więzów (rozdz. 4.21). Natomiast rozdziale 4.2.2 wprowadzając dodatkowe zmienne  $x^+$  i  $x^-$  proponuje interesujące podejście do zagadnienia linearyzacji funkcji kosztu. W podrozdziale 4.4 doktorant trafnie zauważa, że rozwiązywane zagadnienie może być potraktowane jako problem optymalizacyjny mieszany, całkowitoliczbowy, liniowy i ostatecznie definiuje go za pomocą równań 4.26 do 4.31.

## 5 UWAGI KRYTYCZNE

Mimo wysokiego poziomu merytorycznego całej rozprawy, autor nie ustrzegł się kilku błędów.

Praca jest stosunkowo obszerna, Doktorant w kilku początkowych rozdziałach zamieścił informacje, które nie są bezpośrednio związane z tematem pracy. W efekcie czytelnik może odnieść wrażenie, że jest to celowy zabieg mający na celu sztuczne zwiększenie objętości pracy np.

- paragrafy poświęcone COVID,
- paragrafy poświęcone strajkom kontrolerów,
- opisy wypadków i incydentów lotniczych powinny być dobrane bliżej podstawowej tematyki pracy,
- rozbudowany opis wpływu lotnictwa na środowisko,
- opisy standardów ARINC (str. 50)
- opis dynamiki samolot, gdy w pracy jedynie wspomniano o wykorzystaniu równań 2.8 i 2.9.

W mojej opinii, szczególnie w rozdziale pierwszym, powinna być zastosowana inna kolejność części podrozdziałów. Naturalną kolejnością jest wprowadzenie czytelnika w temat poruszanego zagadnienia oraz zasygnalizowanie zauważonych problemów, co powinno prowadzić do zdefiniowania celu i tezy pracy. W przypadku recenzowanej rozprawy Autor zapoznaje czytelnika z tematem formułuje cel, zakres i tezę pracy po czym wraca do prezentacji tematu. Taka kolejność treści w połączeniu z wspomnianą wcześniej znaczną liczbą opisów niezwiązanych bezpośrednio z tematem pracy sprawiają, że rozdział pierwszy sprawia wrażenie chaotycznego. W tym miejscu muszę zaznaczyć, że w pozostałych rozdziałach taka sytuacja już nie ma miejsca. zostały one napisane logicznie, a ich części mają właściwą kolejność.

Jak wspomniano na wstępie niniejszej recenzji, lektura rozdziału pierwszego w pewien sposób sugeruje, że opracowany w model rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia separacji czasowych zostanie następnie wykorzystany do opisu sekwencjonowania ruchu samolotów. Niestety tak się nie stało. Obie części pracy nie zostały połączone we wspólną całość. W ten sposób brak jest naturalnej kontynuacji między rozdziałem trzecim i czwartym. Może to u czytelnika skutkować pewnym niedosytem i rozczarowaniem. Moim zdaniem jest to słaba strona recenzowanej rozprawy.

Dodatkowo, po zapoznaniu się z rozprawą doktorską pana mgr. inż. Adriana Pawełka mam kilka drobnych uwag szczegółowych:

- rysunek 1.2 w zasadzie nie wnosi nic nowego do treści pracy.

- rysunki 2.7 – 2.9 podkreślają nakład pracy wykonanej przez Doktoranta niezbędny do pozyskania wymaganych danych, jednak nie zawierają istotnych informacji z punktu widzenia rozwiązywanego problemu,
- równanie 3.14 zostało niepoprawnie zapisane,
- w przypadku równania 4.20 brakuje wyjaśnienia w jaki sposób wyliczono przedstawione następnie funkcje kosztu.

## 6 WNIOSKI KOŃCOWE

Mimo wymienionych we wcześniejszych rozdziałach niniejszej recenzji słabszych stron opiniowanej rozprawy oraz uwag krytycznych pod jej kierunkiem uważam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska pana mgr. inż. Adriana Pawełka charakteryzuje się bardzo dobrym i spełniającym w całym zakresie wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi poziomem merytorycznym. Przedstawia indywidualne nowatorskie osiągnięcia naukowe Doktoranta w obszarze lotnictwa z uwzględnieniem cech charakterystycznych samolotu jako obiektu badań. Opisane w rozprawie osiągnięcia mogą być wykorzystane w jego przyszłych badaniach naukowych. Dodatkowo są one na tyle uniwersalne, że mogą być wykorzystane jako narzędzia przez innych badaczy w różnych obszarach inżynierii mechanicznej. Lektura rozprawy przekonuje, że Doktorant posiada bardzo dużą wiedzę w zakresie tematyki poruszanej w pracy i potrafi ją prawidłowo wykorzystać w swoich badaniach. Pan mgr inż. Adrian Pawełek w pełni posiadał umiejętność formułowania celu naukowego badań, zna metodyki prowadzenia badań naukowych oraz potrafi wyciągać wnioski poparte wiedzą posiadaną w obszarach objętych przedstawioną rozprawą.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna, zgodnie z warunkami określonymi w art. 13 ustawy „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65 poz. 595 z dnia 14.03.2003 r.).

Tomasz Rogliński

