prof. dr hab. inż. Tomasz Rogalski
Katedra Awioniki i Sterowania
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictw
Politechnika Rzeszowska
al. Powstańców Warszawy 12
35-959 Rzeszów

Rzeszów, dn. 25.08.2026r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Ewy Żesławskiej

pt. "Inteligentne harmonogramowanie zadań lotniczych dla floty UAV z wykorzystaniem technologii algebraiczno-logicznego meta-modelowania w warunkach dynamicznych ograniczeń operacyjnych"

1. UWAGI OGÓLNE NA TEMAT ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Ewy Żesławskiej zatytułowana „Inteligentne harmonogramowanie zadań lotniczych dla floty UAV z wykorzystaniem technologii algebraiczno-logicznego meta-modelowania w warunkach dynamicznych ograniczeń operacyjnych" została przygotowana w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Promotorem rozprawy jest dr hab. Michał Kruk, prof. SGGW, natomiast funkcję promotora pomocniczego pełni dr Zbigniew Gomółka.

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma charakter monograficzny i obejmuje siedem zasadniczych rozdziałów, poprzedzonych streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz wykazem najważniejszych oznaczeń. Całość uzupełniają spisy rysunków, tabel i algorytmów oraz bibliografia. Praca dotyczy problemu harmonogramowania zadań operacyjnych realizowanych przez flotę bezzałogowych statków powietrznych w warunkach dynamicznie zmieniających się ograniczeń czasowych, przestrzennych i dostępnych zasobów.

Problematyka podjęta w rozprawie jest aktualna i istotna zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Współczesne operacje bezzałogowych statków powietrznych realizowane są w coraz bardziej złożonych warunkach operacyjnych, w których konieczne jest jednoczesne uwzględnianie dostępności statków powietrznych, możliwości wykorzystania określonych elementów przestrzeni powietrznej, ograniczeń czasowych realizacji zadań oraz zakłóceń pojawiających się już w trakcie wykonywania zaplanowanej misji. W konsekwencji harmonogram opracowany przed rozpoczęciem realizacji zadań może w krótkim czasie utracić swoją aktualność, a system zarządzania flotą powinien posiadać możliwość odpowiedniej reakcji na zmianę warunków działania.

Z punktu widzenia organizacji operacji lotniczych istotne jest również to, że bezzałogowy statek powietrzny nie funkcjonuje jako obiekt odizolowany od otoczenia. Jego zadania realizowane są w środowisku, którego organizacja ma charakter wielowarstwowy, obejmuje między innymi reguły wykorzystania przestrzeni powietrznej, ograniczenia dostępności jej poszczególnych elementów, uwarunkowania czasowe, dostępność zasobów oraz procedury wynikające z konieczności bezpiecznej realizacji operacji. Wraz ze wzrostem liczby operacji UAV oraz dążeniem do ich coraz ściślejszej integracji z istniejącym ruchem załogowych statków powietrznych rośnie znaczenie metod umożliwiających nie

tylko przygotowanie harmonogramu działania, lecz również umożliwiających jego szybką modyfikację w odpowiedzi na zmieniający się stan środowiska operacyjnego.

Doktorantka proponuje wykorzystanie w tym celu technologii Algebraiczno-Logicznego Meta-Modelowania (ALMM). Sama technologia ALMM nie jest rozwiązaniem nowym i była wcześniej rozwijana oraz wykorzystywana do formalnego opisu wieloetapowych procesów decyzyjnych i rozwiązywania problemów optymalizacji dyskretnej. Nowości przedstawionej rozprawy należy zatem poszukiwać przede wszystkim w adaptacji i rozwinięciu tego formalizmu dla potrzeb harmonogramowania operacji flot UAV oraz w opracowaniu modeli uwzględniających kolejne klasy ograniczeń występujących w rozważanym środowisku operacyjnym.

Doktorantka otrzymuje końcowe rozwiązanie w efekcie ewolucyjnej rozbudowy modelu bazowy procesu harmonogramowania. Rozszerzając go stopniowo o kolejne klasy ograniczeń: dostępności zasobów UAV, współdzielenie tras Przelotu, okna czasowe realizacji zadań oraz zakłócenia operacyjne. Ostatecznie przygotowała model pozwalający zwiększać stopień odwzorowania rzeczywistych warunków wykonywania operacji przy zachowaniu wspólnej struktury formalnej procesu decyzyjnego. Ma to znaczenie nie tylko z punktu widzenia opisu matematycznego problemu, lecz również jego późniejszej implementacji algorytmicznej.

Przeprowadzone w rozprawie badania nie uwzględniają wszystkich czynników występujących podczas rzeczywistych operacji bezzałogowych statków powietrznych. Analizowany problem został ograniczony do wybranych klas uwarunkowań operacyjnych, które mogły zostać jednoznacznie, wystarczająco dokładnie odwzorowane w opracowanych modelach na potrzeby rozprawy, jednocześnie zachowując najważniejsze cechy i funkcje modelu możliwe do wykorzystania w przyszłych badaniach. Przyjęty sposób stopniowego rozszerzania modelu pozwala bowiem na kontrolowane zwiększanie złożoności analizowanego problemu i daje podstawę do dalszego rozwijania przedstawionej technologii.

Uważam temat rozprawy za aktualny, ważny i odpowiadający potrzebom rozwijających się systemów pojazdów bezzałogowych (nie tylko bezzałogowych statków powietrznych). Zaproponowane rozwiązanie łączy formalne modelowanie procesu decyzyjnego z problematyką organizacji operacji UAV, a uzyskane wyniki mogą mieć znaczenie zarówno dla dalszych badań nad harmonogramowaniem, jak również dla rozwoju systemów wspomagających planowanie i rekonfigurację zadań pojazdów bezzałogowych.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa została podzielona na siedem rozdziałów merytorycznych. Jej układ odpowiada kolejnym etapom realizacji przyjętego problemu badawczego: od przedstawienia podstaw teoretycznych i charakterystyki środowiska operacyjnego, poprzez formalizację procesu harmonogramowania i opracowanie metod jego rozwiązania, aż do eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanej technologii. Uzupełnienie rozprawy stanowią: wykaz najważniejszych oznaczeń, spisy rysunków, tabel i algorytmów oraz bibliografia. Przyjętą strukturę pracy oceniam jako logiczną i podporządkowaną realizacji jej celu oraz weryfikacji postawionej tezy badawczej.

W rozdziale pierwszym, zatytułowanym „Wstęp", Doktorantka przedstawia motywację podjęcia badań, wskazuje znaczenie problemu harmonogramowania zadań realizowanych przez floty bezzałogowych statków powietrznych oraz uzasadnia potrzebę uwzględniania dynamicznie zmieniających się warunków operacyjnych. Sformułowano cel główny:

[redacted]

„... opracowanie modelu oraz metod harmonogramowania zadań logistycznych dla flot bezzałogowych statków powietrznych (UAV), operujących w warunkach dynamicznie zmieniającej się dostępności przestrzeni powietrznej.

i cele szczegółowe pracy, określono jej zakres oraz postawiono tezę badawczą:

Zastosowanie technologii algebraiczno-logicznego meta-modelowania umożliwia konstrukcję modeli harmonogramowania zadań dla flot UAV, które zapewniają wyznaczanie dopuszczalnych i efektywnych rozwiązań w warunkach dynamicznie zmieniających się ograniczeń przestrzeni powietrznej oraz występowania zakłóceń operacyjnych, bez konieczności każdorazowej rekonstrukcji modelu decyzyjnego.

Rozdział drugi, zatytułowany „Inteligentna technologia algebraiczno-logicznego meta- modelowania ALMM", przedstawia podstawy formalne technologii wykorzystanej w rozprawie. Omówiono w nim strukturę dyskretnego, wieloetapowego procesu decyzyjnego, przestrzeń stanów i decyzji, funkcję przejścia oraz kryterium optymalizacji. Przedstawiono również architekturę Inteligentnego ALMM Systemu oraz wybrane dotychczasowe zastosowania tej technologii. Rozdział ten stanowi podstawę teoretyczną dalszych rozważań. Należy przy tym zaznaczyć, że sama technologia ALMM była rozwijana wcześniej, dlatego zasadniczego wkładu Doktorantki należy poszukiwać w jej adaptacji i rozwinięciu dla rozważanego problemu harmonogramowania operacji flot UAV.

Rozdział trzeci, „Problem harmonogramowania zadań flot UAV w obszarze okołolotniskowym", jest charakterystyką środowiska, w którym ma funkcjonować opracowany system. Przedstawiono zasoby UAV, graf połączeń lotniczych, trajektorie realizacji zadań, dostępność przedziałów czasowych, strukturę danych opisujących zadania oraz klasy zakłóceń mogących wystąpić w czasie realizacji procesu. Rozdział ten uważam za istotny z punktu widzenia aplikacyjnego charakteru rozprawy Jest łącznikiem pomiędzy formalnym aparatem ALMM, a rzeczywistymi operacjami bezzałogowych statków powietrznych. Z perspektywy zastosowań lotniczych przyjęty opis stanowi uproszczenie środowiska operacyjnego. W rzeczywistości flota UAV może być heterogeniczna pod względem charakterystyk lotnych, długotrwałości lotu, dostępnego zasobu energetycznego, wyposażenia zadaniowego oraz zdolności do realizacji poszczególnych klas operacji. Dodatkowo dostępność przestrzeni w rejonie lotniska może wynikać nie tylko z operacji innych UAV, lecz również z nadrzędnych uwarunkowań organizacji ruchu lotniczego, w tym ruchu załogowego. Przyjęty w rozprawie poziom uproszczeń uważam za właściwy dla rozwiązania problemu harmonogramowania, wystarczająco dokładny dla zachowania charakteru zjawiska, a konstrukcja zaproponowanych modeli daje możliwość ich dalszego rozszerzania o tego rodzaju.

Rozdział czwarty, „Modele ALMM dla harmonogramowania zadań operacyjnych dla floty UAV", stanowi w mojej ocenie zasadniczy trzon rozprawy i zawiera jej najważniejszy wkład formalny. Doktorantka rozpoczyna od modelu bazowego, a następnie tworzy jego kolejne rozszerzenia: ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D. Poszczególne modele uwzględniają odpowiednio dostępność czasową zasobów UAV, ograniczenia związane ze współdzieleniem korytarzy powietrznych, okna czasowe realizacji zadań oraz zakłócenia występujące w trakcie procesu harmonogramowania. Tak skonstruowana kaskada ma szczególne znaczenie, ponieważ każda kolejna warstwa modelu zachowuje podstawową strukturę formalną ALMM, rozszerzając ją o następną klasę ograniczeń operacyjnych. Pozwala to stopniowo zwiększać stopień odwzorowania złożoności rzeczywistego systemu bez konieczności konstruowania od podstaw odrębnego modelu dla każdej konfiguracji problemu.

Za wartościową cechę rozwiązania przedstawionego w rozdziale czwartym uważam również jego potencjalną komponentowość. Poszczególne rozszerzenia formalizmu odpowiadają określonym klasom ograniczeń i mogą być traktowane jako wyspecjalizowane elementy rozwijające model bazowy. Taka organizacja tworzy podstawy do dalszego rozwoju technologii w kierunku modularnej, a w implementacji informatycznej również obiektowej biblioteki modeli ALMM, umożliwiającej konstruowanie modeli procesów decyzyjnych poprzez dobór komponentów odpowiadających właściwościom rozwiązywanego problemu.

Rozdział piąty, zatytułowany „Algorytmy harmonogramowania zadań operacyjnych dla floty UAV", stanowi bezpośrednie rozwinięcie modeli formalnych przedstawionych w rozdziale czwartym. Doktorantka dokonuje przejścia od opisu algebraiczno-logicznego do procedur umożliwiających praktyczne wyznaczanie harmonogramów dla kolejnych wariantów modelu. Opracowane algorytmy zachowują strukturę odpowiadającą kaskadzie modeli ALMM, dzięki czemu kolejne klasy ograniczeń znajdują swoje odzwierciedlenie nie tylko na poziomie formalnym, lecz również obliczeniowym. Szczególne znaczenie ma algorytm obsługi zakłóceń, umożliwiający aktualizację stanu procesu, ponowne wyznaczenie zbioru decyzji dopuszczalnych oraz rekonfigurację harmonogramu w odpowiedzi na zmianę warunków realizacji misji. Rozdziały czwarty i piąty tworzą zatem spójną całość: pierwszy definiuje modele procesu decyzyjnego, natomiast drugi przedstawia sposób ich praktycznej realizacji.

Rozdział szósty, „Badania eksperymentalne", poświęcono weryfikacji opracowanych modeli i algorytmów. Doktorantka analizuje działanie zaproponowanego rozwiązania dla zróżnicowanych konfiguracji liczby zadań i jednostek UAV oraz dla kolejnych klas ograniczeń wprowadzanych w modelach ALMM. Badania obejmują również sytuacje występowania zakłóceń i konieczności rekonfiguracji wcześniej wyznaczonego harmonogramu. Przyjęty sposób organizacji eksperymentów pozwala obserwować wpływ kolejnych elementów modelu na proces planowania oraz ocenić zdolność systemu do reagowania na zmieniające się warunki operacyjne.

Ostatni, siódmy rozdział rozprawy zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań, najważniejsze wnioski oraz wskazanie możliwych kierunków dalszego rozwoju opracowanej technologii. Doktorantka odnosi uzyskane rezultaty do przyjętych celów badawczych i wskazuje możliwości rozszerzenia rozwiązania o kolejne klasy ograniczeń i uwarunkowań występujących podczas rzeczywistych operacji UAV.

W mojej ocenie struktura rozprawy została właściwie dobrana do charakteru rozwiązywanego problemu. Szczególnie korzystne jest wyraźne rozdzielenie formalizacji problemu, konstrukcji modeli, ich implementacji algorytmicznej oraz badań eksperymentalnych. Centralne miejsce zajmują przy tym rozdziały czwarty i piąty, które należy rozpatrywać łącznie: przedstawiona w pierwszym z nich kaskada modeli ALMM znajduje w kolejnym bezpośrednie odwzorowanie w strukturze opracowanych algorytmów. Taki sposób organizacji rozwiązania uważam za jedną z istotnych zalet rozprawy.

3. PRZYJĘTA METODYKA BADAŃ

Przyjęta przez Doktorantkę metodyka badań jest właściwa dla rozprawy o charakterze modelowym i aplikacyjnym, której celem jest opracowanie formalnej metody wspomagania procesu decyzyjnego oraz jej eksperymentalna weryfikacja. Postępowanie badawcze obejmuje kolejne etapy prowadzące od identyfikacji problemu harmonogramowania zadań flot UAV i określenia jego uwarunkowań

operacyjnych, poprzez formalizację z wykorzystaniem technologii ALMM, konstrukcję modeli i odpowiadających im algorytmów, aż do przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

Doktorantka rozpoczęła badania od analizy istniejących metod harmonogramowania zadań UAV oraz formalnych metod modelowania procesów decyzyjnych. Na tej podstawie określiła wymagania stawiane rozwiązaniu przeznaczonemu do działania w warunkach zmiennej dostępności zasobów i przestrzeni operacyjnej. Następnie opracowała formalny opis analizowanego procesu z wykorzystaniem technologii ALMM oraz zaproponowała kaskadę modeli uwzględniających kolejne klasy ograniczeń występujących podczas realizacji zadań przez flotę UAV.

Przyjęcie kaskadowego sposobu budowy modelu uważam za właściwe również z punktu widzenia specyfiki analizowanego systemu lotniczego. Rzeczywista operacja UAV podlega jednocześnie wielu uwarunkowaniom, przy czym nie wszystkie muszą być aktywne w każdym stanie procesu. Stopniowe wprowadzanie tych uwarunkowań do modelu pozwala zwiększać stopień odwzorowania środowiska operacyjnego bez utraty możliwości identyfikacji wpływu poszczególnych klas ograniczeń na proces harmonogramowania.

Na uwagę zasługuje konsekwentne powiązanie formalizacji z algorytmizacją rozwiązania. Poszczególne etapy rozwoju modeli znajdują bezpośrednie odzwierciedlenie w konstrukcji odpowiadających im algorytmów harmonogramowania. Dzięki temu zachowana została spójność pomiędzy warstwą formalną i obliczeniową rozprawy. Ma to istotne znaczenie w przypadku rozwiązania przeznaczonego do reagowania na zmieniające się warunki operacyjne, ponieważ modyfikacja warunków dopuszczalności decyzji musi prowadzić do odpowiedniej zmiany dalszego przebiegu procesu harmonogramowania.

Szczególnie interesujący z punktu widzenia zastosowań lotniczych jest sposób potraktowania zakłóceń. W rzeczywistym środowisku operacyjnym wcześniej przygotowany plan może utracić wykonalność wskutek zmiany dostępności statku powietrznego, przestrzeni operacyjnej lub samego zadania. Przyjęta metodyka zakłada w takim przypadku aktualizację stanu procesu i ponowne wyznaczenie dalszej części harmonogramu. Takie podejście odpowiada naturze operacji lotniczych, w których decyzje podejmowane są sekwencyjnie, a skutki zdarzeń występujących podczas realizacji misji muszą być uwzględniane w kolejnych decyzjach.

Istotnym etapem przyjętej metodyki jest eksperymentalna weryfikacja kolejnych modeli kaskady. Scenariusze badawcze dobrano w sposób umożliwiający analizę wpływu wprowadzanych ograniczeń na przebieg procesu harmonogramowania, a także ocenę zachowania rozwiązania w sytuacjach wymagających rekonfiguracji. W badaniach wykorzystano scenariusze i dane odwzorowujące wybrane uwarunkowania rzeczywistego środowiska operacyjnego, w szczególności czasową dostępność zasobów i przestrzeni oraz występowanie zakłóceń. Pozwala to ocenić nie tylko możliwość wyznaczenia harmonogramu, ale również zachowanie zaproponowanego rozwiązania po zmianie warunków, dla których harmonogram ten został pierwotnie utworzony.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że proces walidacji nie został ograniczony do pojedynczego, docelowego modelu. Kolejne eksperymenty odpowiadają następnym etapom rozwoju formalizmu, co umożliwia obserwację wpływu poszczególnych rozszerzeń na właściwości procesu harmonogramowania. Uważam takie postępowanie za metodologicznie uzasadnione, ponieważ pozwala oddzielić skutki wprowadzania kolejnych klas ograniczeń i jednocześnie zweryfikować zasadność kaskadowej konstrukcji całego rozwiązania.

Przyjęty zakres badań wymaga oczywiście przyjęcia określonego poziomu abstrakcji rzeczywistej operacji lotniczej. W szczególności nie wszystkie właściwości statków powietrznych i czynniki wpływające na wykonanie misji są bezpośrednio odwzorowane w modelu. Nie traktuję tego jako uchybienia metodologicznego. Rozwiązanie koncentruje się na warstwie harmonogramowania i rekonfiguracji procesu, natomiast właściwości takie jak heterogeniczność floty, zmienność parametrów lotu, stan energetyczny statku powietrznego czy dodatkowe ograniczenia wynikające ze współistnienia z innymi użytkownikami przestrzeni mogą stanowić przedmiot dalszego rozszerzania formalizmu.

W mojej ocenie przyjęta metodyka badań jest poprawna i odpowiednia do realizacji celu rozprawy oraz weryfikacji postawionej tezy badawczej. Zachowano właściwą kolejność prowadzenia badań, od analizy problemu i jego uwarunkowań operacyjnych, poprzez formalizację, konstrukcję modeli i algorytmów, aż do ich eksperymentalnej oceny. Szczególnie pozytywnie oceniam zachowanie bezpośredniego związku pomiędzy wzrostem złożoności modelu formalnego a stopniowym uwzględnianiem kolejnych uwarunkowań rzeczywistego procesu realizacji zadań przez flotę UAV.

4. OTRZYMANE WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Przedstawione wyniki badań zawierają istotne elementy nowości naukowej oraz posiadają potencjał aplikacyjny. Należy przy tym zaznaczyć, że sama technologia Algebraiczno-Logicznego Meta-Modelowania była rozwijana wcześniej. Oryginalnego wkładu Doktorantki należy zatem poszukiwać przede wszystkim w jej adaptacji i rozwinięciu dla analizowanego problemu, konstrukcji kaskady modeli odpowiadających kolejnym klasom ograniczeń operacyjnych, opracowaniu odpowiadających im algorytmów oraz eksperymentalnej weryfikacji rozwiązania.

Do najważniejszych osiągnięć Doktorantki zaliczam:

- formalizację problemu harmonogramowania zadań operacyjnych floty UAV jako dyskretnego, wieloetapowego procesu decyzyjnego z wykorzystaniem technologii ALMM,
- opracowanie autorskiej kaskady modeli ALMM, ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D, umożliwiającej sukcesywne uwzględnianie dostępności zasobów UAV, współdzielenia korytarzy powietrznych, okien czasowych oraz zakłóceń procesu harmonogramowania,
- opracowanie mechanizmu adaptacyjnej rekonfiguracji harmonogramu, umożliwiającego wykorzystanie aktualnego stanu procesu jako punktu wyjścia do ponownego wyznaczenia jego przyszłego przebiegu po wystąpieniu zakłócenia,
- opracowanie algorytmów realizujących kolejne modele kaskady oraz integrację formalizmu ALMM z metodami optymalizacyjnymi wykorzystywanymi podczas wyznaczania dopuszczalnych harmonogramów,
- opracowanie heurystyki redukcji przestrzeni decyzji, ograniczającej liczbę rozpatrywanych wariantów i wspomagającej proces wyznaczania harmonogramu,
- opracowanie metod planowania i realokacji zadań uwzględniających dynamiczną dostępność zasobów oraz elementów przestrzeni operacyjnej,
- eksperymentalną weryfikację kolejnych modeli kaskady dla zróżnicowanych scenariuszy operacyjnych, obejmujących również przypadki wymagające rekonfiguracji wcześniej wyznaczonego harmonogramu.

Za najciekawszy element rozprawy uważam kaskadową konstrukcję modeli ALMM. Model bazowy jest sukcesywnie rozszerzany o kolejne klasy ograniczeń przy zachowaniu wspólnego rdzenia

formalnego procesu decyzyjnego. Z punktu widzenia zastosowań lotniczych konstrukcja taka dobrze odpowiada złożoności rzeczywistego środowiska operacyjnego, w którym możliwość wykonania zadania zależy jednocześnie od dostępności statku powietrznego, dostępności określonych elementów przestrzeni, ograniczeń czasowych oraz zdarzeń występujących podczas realizacji operacji. Poszczególne uwarunkowania wspólnie kształtują zbiór decyzji możliwych do podjęcia w aktualnym stanie systemu.

Szczególnie interesujący jest w tym kontekście model ALMM-D. W rzeczywistym systemie lotniczym wcześniej przygotowany plan może utracić wykonalność wskutek zmiany dostępności statku powietrznego, przestrzeni operacyjnej lub samego zadania. Zmiana taka może być również konsekwencją zdarzeń lub decyzji powstających w innych warstwach organizacji ruchu lotniczego. Zaproponowane rozwiązanie nie wymaga modelowania wszystkich mechanizmów tych warstw, lecz pozwala uwzględnić ich skutki poprzez zmianę warunków dopuszczalności dalszej realizacji procesu i odpowiednią rekonfigurację harmonogramu. Uważam tę właściwość za wartościową z punktu widzenia przyszłej integracji operacji UAV z bardziej złożonym środowiskiem zarządzania przestrzenią powietrzną.

Na uwagę zasługuje również bezpośrednie przełożenie kaskady modeli na strukturę opracowanych algorytmów. Poszczególne rozszerzenia formalizmu znajdują odpowiedniki w procedurach obliczeniowych, co umożliwia praktyczne generowanie trajektorii procesu i harmonogramów zgodnych z warunkami dopuszczalności. Taka organizacja rozwiązania ma również potencjał dalszego rozwoju w kierunku modularnej i obiektowej implementacji, w której wspólny mechanizm ALMM może być rozszerzany o komponenty odpowiadające poszczególnym klasom ograniczeń.

Oprócz wyników o charakterze naukowym Doktorantka uzyskała również rezultaty posiadające potencjał aplikacyjny. Do najważniejszych z nich zaliczam:

- implementację środowiska umożliwiającego modelowanie, generowanie i rekonfigurację harmonogramów dla kolejnych wariantów modeli,
- opracowanie generatorów danych eksperymentalnych umożliwiających tworzenie scenariuszy badań dla różnych konfiguracji analizowanego środowiska,
- wykorzystanie w procesie walidacji danych i scenariuszy odwzorowujących wybrane rzeczywiste uwarunkowania organizacji przestrzeni operacyjnej,
- wykazanie możliwości wykorzystania opracowanej technologii jako podstawy systemów wspomagających planowanie i rekonfigurację zadań bezzałogowych statków powietrznych.

Przeprowadzone badania potwierdzają możliwość generowania harmonogramów spełniających ograniczenia wprowadzane w kolejnych modelach kaskady oraz rekonfiguracji procesu w przypadku analizowanych zakłóceń. Szczególnie wartościowe jest powiązanie scenariuszy eksperymentalnych z kolejnymi etapami rozwoju modelu, dzięki czemu możliwa jest ocena wpływu poszczególnych klas ograniczeń na przebieg procesu harmonogramowania.

Przedstawione wyniki należy jednocześnie interpretować z uwzględnieniem przyjętego poziomu abstrakcji. Badania nie obejmują pełnego odwzorowania wszystkich właściwości rzeczywistego systemu lotniczego. Dalszego rozwinięcia wymagałoby między innymi uwzględnienie heterogeniczności floty, zróżnicowanych charakterystyk lotnych i energetycznych UAV, niepewności czasu realizacji zadań oraz bardziej złożonych relacji wynikających ze współistnienia operacji bezzałogowych z innymi użytkownikami przestrzeni powietrznej. Nie zmienia to pozytywnej oceny otrzymanych wyników,

a kaskadowa konstrukcja modeli daje podstawy do stopniowego wprowadzania kolejnych klas ograniczeń.

W mojej ocenie Doktorantka zrealizowała założone cele badawcze. Wyniki przeprowadzonych badań, rozpatrywane łącznie z formalną konstrukcją modeli oraz ich algorytmiczną realizacją, dostarczają podstaw do **pozytywnej weryfikacji postawionej w rozprawie tezy badawczej**. Opracowane rozwiązanie stanowi wartościowy wkład do badań nad inteligentnym harmonogramowaniem flot bezzałogowych statków powietrznych oraz formalnymi metodami wspomagania procesów decyzyjnych.

5. UWAGI KRYTYCZNE

Przedstawiona rozprawa została opracowana na wysokim poziomie merytorycznym i i bardzo starannie przygotowana od strony technicznej, edycyjnej. Nie znajduję istotnych słabych stron rozprawy w żadnym z powyższych obszarów.

Lektura pracy nasunęła jednak kilka uwag i pytań, które w mojej ocenie mogą stanowić interesujący przedmiot dyskusji podczas publicznej obrony oraz wskazywać kierunki dalszego rozwoju opracowanego rozwiązania.

1. W przedstawionych modelach zasoby UAV są identyfikowane indywidualnie, a czas realizacji zadania może zależeć od konkretnej pary zadanie-statek powietrzny. W rzeczywistych zastosowaniach flota UAV może jednak charakteryzować się znaczną heterogenicznością wynikającą między innymi z różnych charakterystyk lotnych, długotrwałości lotu, udźwigu, wyposażenia zadaniowego oraz zdolności do realizacji określonych typów misji. Interesujące byłoby wyjaśnienie, w jakim zakresie obecna struktura modeli pozwala uwzględnić taką heterogeniczność i czy wymagałoby to modyfikacji przestrzeni stanów oraz zbiorów decyzji dopuszczalnych, czy jedynie odpowiedniej parametryzacji istniejącego modelu.
2. Z punktu widzenia realizacji operacji lotniczej istotnym ograniczeniem jest zasób energetyczny statku powietrznego. Wykonanie przydzielonego zadania nie powinno być rozpatrywane niezależnie od możliwości bezpiecznego zakończenia misji, w tym powrotu do miejsca lądowania z wymaganym zapasem energii. W jaki sposób można byłoby rozszerzyć zaproponowany formalizm o bieżący stan energetyczny UAV oraz warunek zachowania rezerwy niezbędnej do zakończenia operacji? Czy zmienna taka powinna stanowić dodatkową składową stanu zasobu, czy może być uwzględniana poprzez odpowiednią konstrukcję zbioru decyzji dopuszczalnych?
3. Rozprawa dotyczy operacji UAV w obszarze okołolotniskowym, a więc w środowisku, w którym bezzałogowe statki powietrzne mogą współdzielić przestrzeń operacyjną z innymi jej użytkownikami, w tym z lotnictwem załogowym. Decyzje podejmowane w innych warstwach systemu lotniczego mogą powodować czasową zmianę dostępności określonych fragmentów przestrzeni dla operacji UAV. Czy zaproponowana architektura może współpracować z zewnętrznym systemem ATM/UTM w taki sposób, aby zmiany dostępności przestrzeni były przekazywane do warstwy harmonogramowania i prowadziły do aktualizacji zbioru decyzji dopuszczalnych oraz w razie potrzeby, rekonfiguracji harmonogramu?
4. Za jeden z najciekawszych elementów rozprawy uważam mechanizm adaptacyjnej rekonfiguracji opracowany w ramach modelu ALMM-D. W przedstawionych eksperymentach analizowane są wybrane klasy zakłóceń, takie jak awaria UAV, anulowanie zadania czy

[redacted]

pojawienie się nowego zadania. Powstaje jednak pytanie o granice lokalnej rekonfiguracji. Czy można określić warunki, w których zachowanie wykonanej części harmonogramu i ponowne wyznaczenie jedynie jego przyszłego segmentu jest wystarczające, oraz sytuacje, w których charakter lub skala zakłócenia wymagałyby ponownego rozwiązania problemu w szerszym zakresie?

5. Brak jest wskaźnika pokazującego efektywność otrzymanego rozwiązania. Jedyna ocena efektywności jest realizowana przez wykonanie szeregu symulacji i analizę statystyczną wyników. Brak takiego wskaźnika jest szczególnie odczuwalny, gdy otrzymane harmonogramy nie zapewniają realizacji wszystkich zadań i nie ma możliwości ilościowej oceny skuteczności działania algorytmu.
6. Założenie o przelocie najkrótszą drogą „po prostej" wydaje się być sztuczne i nieefektywne w rzeczywistości.

Powyższe uwagi nie podważają poprawności przyjętej metodyki ani uzyskanych wyników. Dotyczą przede wszystkim granic przyjętego poziomu abstrakcji oraz możliwości dalszego zwiększania stopnia odwzorowania rzeczywistego środowiska operacyjnego. W mojej ocenie opracowana kaskadowa struktura modeli stwarza dobre podstawy do podejmowania takich badań.

6. WNIOSKI KOŃCOWE

Poziom merytoryczny przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej oceniam wysoko. Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z zakresu inteligentnego harmonogramowania zadań flot bezzałogowych statków powietrznych z wykorzystaniem technologii Algebraiczno-Logicznego Meta-Modelowania. Doktorantka wykazała się bardzo dobrą znajomością analizowanej problematyki, umiejętnością prowadzenia samodzielnych badań naukowych oraz właściwym wykorzystaniem metod formalnego modelowania i eksperymentalnej weryfikacji opracowanego rozwiązania. Za najważniejsze osiągnięcie rozprawy uważam spójne połączenie formalnego modelowania procesu decyzyjnego z jego realizacją algorytmiczną oraz wykazanie możliwości wykorzystania opracowanej technologii do reagowania na zmiany warunków operacyjnych występujące podczas realizacji zadań przez flotę UAV. Z punktu widzenia zastosowań lotniczych istotną właściwością zaproponowanego podejścia jest możliwość stopniowego zwiększania stopnia odwzorowania złożonego i wielowarstwowego środowiska, w którym realizowane są operacje bezzałogowych statków powietrznych. Dostępność zasobów UAV, możliwość wykorzystania określonych elementów przestrzeni operacyjnej, ograniczenia czasowe oraz występujące zakłócenia wspólnie kształtują zbiór decyzji możliwych do podjęcia w aktualnym stanie systemu. Przeprowadzone badania eksperymentalne zostały zaplanowane i wykonane w sposób umożliwiający ocenę poprawności opracowanych modeli oraz skuteczności zaproponowanych metod harmonogramowania i rekonfiguracji. Uzyskane wyniki potwierdzają zasadność przyjętych założeń badawczych oraz wskazują na potencjał wykorzystania opracowanego rozwiązania w systemach wspomagających planowanie operacji bezzałogowych statków powietrznych.

Przedstawione w recenzji uwagi mają charakter przede wszystkim dyskusyjny i dotyczą granic przyjętego poziomu abstrakcji oraz możliwości dalszego rozwijania zaproponowanej technologii, między innymi w zakresie uwzględnienia heterogeniczności floty, ograniczeń energetycznych oraz współdziałania warstwy harmonogramowania z zewnętrznymi systemami zarządzania przestrzenią powietrzną. Nie podważają one wartości naukowej rozprawy ani poprawności uzyskanych wyników.

Stwierdzam, że Doktorantka zrealizowała założone cele badawcze, a **postawiona w rozprawie teza badawcza została potwierdzona**. Opracowane rozwiązanie stanowi wartościowy wkład w rozwój metod formalnego modelowania procesów decyzyjnych oraz inteligentnego harmonogramowania zadań flot bezzałogowych statków powietrznych.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawę doktorską Pani mgr inż. Ewy Żesławskiej pt.:

„Inteligentne harmonogramowanie zadań lotniczych dla floty UAV z wykorzystaniem technologii algebraiczno-logicznego meta-modelowania w warunkach dynamicznych ograniczeń operacyjnych"

oceniam pozytywnie. Uważam, że rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z późn. zm.).

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie Pani mgr inż. Ewy Żesławskiej do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie niniejszej rozprawy doktorskiej

[redacted]

prof. dr hab. inż. Tomasz Rogalski