dr hab. inż. Teresa Mroczek, prof. WSIiZ
Dziekan Kolegium Informatyki Stosowanej
Katedra Sztucznej Inteligencji
Kolegium Informatyki Stosowanej
Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie
ul. Sucharskiego 2
35-225 Rzeszów

Rzeszów, 24.08.2026

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"

przygotowanej pod kierunkiem promotora:
dr hab. inż. Michał Kruk, prof. SGGW

oraz promotora pomocniczego:
dr Zbigniew Gomółka

1. Podstawa prawna sporządzenia recenzji

Recenzję rozprawy doktorskiej mgr inż. Ewy Żesławskiej, ubiegającej się o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, sporządzono na podstawie powołania Rady Dyscyplin: Nauki Fizyczne, Matematyka, Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, Inżynieria Materiałowa Wydziału Nauk Ścisłych i Technicznych Uniwersytetu Rzeszowskiego z dnia 08.07.2026 r.

Recenzję opracowano zgodnie z przepisami ustawy z dnia 20 lipca 2018 r., Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z późn. zm.).

2. Tematyka i cel rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Ewy Żesławskiej dotyczy problematyki inteligentnego harmonogramowania zadań realizowanych przez flotę bezzałogowych statków powietrznych (UAV) w warunkach dynamicznie zmieniających się ograniczeń operacyjnych. Autorka podejmuje problem formalnego modelowania procesu decyzyjnego obejmującego przydział zadań do zasobów UAV, wyznaczanie dopuszczalnych trajektorii ich realizacji oraz uwzględnianie ograniczeń czasowych, przestrzennych i zasobowych wpływających na wykonalność harmonogramu. Podstawę zaproponowanego podejścia stanowi technologia algebraiczno-logicznego meta-modelowania (ALMM), wykorzystana do budowy formalnych modeli procesu harmonogramowania oraz ich kolejnych rozszerzeń odpowiadających wybranym klasom ograniczeń występujących w rozważanym środowisku operacyjnym. Takie ujęcie umożliwia opis zarówno statycznych warunków realizacji zadań, jak i zmian zachodzących w trakcie procesu decyzyjnego, wymagających odpowiedniej rekonfiguracji harmonogramu.

Tematyka rozprawy mieści się w obszarze informatyki technicznej i telekomunikacji, w szczególności w zakresie modelowania i optymalizacji dyskretnych procesów decyzyjnych, algorytmów harmonogramowania oraz metod wspomagania decyzji dla autonomicznych i wielozasobowych systemów UAV.

2.1. Aktualność i znaczenie problematyki

Problematyka podjęta w rozprawie jest aktualna zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Rosnące wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych w zadaniach transportowych, inspekcyjnych, monitorujących i logistycznych powoduje, że coraz większego znaczenia nabierają zagadnienia związane nie tylko z planowaniem pojedynczych misji, lecz przede wszystkim z koordynacją działania wielu jednostek UAV realizujących współbieżnie zbiór zadań w ograniczonej przestrzeni operacyjnej.

W takim ujęciu problem harmonogramowania ma charakter wielokryterialnego i wielozasobowego procesu decyzyjnego, w którym wykonalność przydziału zadania zależy jednocześnie od dostępności jednostek UAV, charakterystyki i czasu realizacji zadań, dostępności przedziałów czasowych, możliwości wykorzystania określonych trajektorii i korytarzy powietrznych oraz występowania zakłóceń zmieniających stan systemu w trakcie realizacji przyjętego harmonogramu. Szczególnego znaczenia nabiera zatem zdolność modelu do uwzględniania dynamicznych zmian warunków operacyjnych i odpowiedniej rekonfiguracji wcześniej wyznaczonych decyzji.

Istotnym aspektem podjętej problematyki jest także konieczność zachowania spójności pomiędzy formalnym modelem procesu decyzyjnego a jego realizacją algorytmiczną. W przypadku systemów obejmujących wiele współdziałających zasobów i różne klasy ograniczeń samo wyznaczenie rozwiązania harmonogramowego nie jest wystarczające. Konieczne jest również określenie zbioru decyzji dopuszczalnych w kolejnych stanach procesu, identyfikowanie sytuacji, w których realizacja przyjętego planu staje się niemożliwa, oraz zapewnienie mechanizmów umożliwiających jego rekonfigurację.

W tym kontekście zastosowanie technologii ALMM stanowi interesującą podstawę formalizacji rozważanego problemu. Przyjęte podejście umożliwia reprezentację procesu harmonogramowania jako dyskretnego, wieloetapowego procesu decyzyjnego, którego przestrzeń stanów i zbiór decyzji dopuszczalnych mogą być modyfikowane w zależności od występujących ograniczeń operacyjnych. Jest to szczególnie istotne w odniesieniu do systemów UAV, w których warunki realizacji zadań mogą zmieniać się już w trakcie wykonywania misji. Podjęta w rozprawie problematyka wpisuje się zatem w aktualny nurt badań dotyczących inteligentnego planowania i harmonogramowania zadań w systemach autonomicznych, ze szczególnym uwzględnieniem systemów wieloagentowych i wielozasobowych funkcjonujących w warunkach dynamicznych ograniczeń. Zarówno charakter rozpatrywanego problemu, jak i przyjęty sposób jego formalizacji uzasadniają jego znaczenie z punktu widzenia dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja.

2.2. Cel rozprawy oraz problem badawczy

W rozdziale pierwszym rozprawy Autorka sformułowała główny cel pracy oraz odpowiadające mu cele szczegółowe, które wyznaczają kolejne etapy realizacji przyjętego programu badawczego. Jako cel główny wskazano opracowanie modelu oraz metod harmonogramowania zadań logistycznych dla floty bezzałogowych statków powietrznych działającej w warunkach dynamicznie zmieniającej się dostępności przestrzeni powietrznej. Tak określony cel właściwie identyfikuje zasadniczy problem rozprawy, którym jest nie tylko wyznaczenie harmonogramu realizacji zadań, lecz formalne odwzorowanie wieloetapowego procesu decyzyjnego oraz zapewnienie możliwości jego adaptacji do zmian zachodzących w środowisku operacyjnym.

Realizacja celu głównego została powiązana z wykorzystaniem technologii ALMM jako formalnej podstawy reprezentacji procesu harmonogramowania. Przyjęta koncepcja zakłada opis procesu poprzez przestrzeń stanów i decyzji, funkcję przejścia oraz zbiory stanów niedopuszczalnych i docelowych, a następnie sukcesywne rozszerzanie modelu o kolejne klasy ograniczeń występujących w rozpatrywanym środowisku UAV. Cele szczegółowe obejmują w konsekwencji formalizację problemu, opracowanie modeli uwzględniających ograniczenia czasowe, przestrzenne i zasobowe, opracowanie algorytmów generowania i rekonfiguracji harmonogramów oraz eksperymentalną ocenę zaproponowanego rozwiązania.

Za istotną cechę przyjętej koncepcji badawczej uważam powiązanie formalizacji matematycznej z jej późniejszą realizacją algorytmiczną. Opracowane modele nie mają służyć wyłącznie

statycznemu opisowi problemu, lecz stanowić podstawę generowania dopuszczalnych trajektorii procesu decyzyjnego i wyznaczania harmonogramów z uwzględnieniem aktualnego stanu systemu oraz obowiązujących ograniczeń. W przypadku pojawienia się zakłóceń koncepcja obejmuje ponadto możliwość rekonfiguracji dalszego przebiegu procesu bez konieczności ponownego konstruowania całego modelu od podstaw.

Sformułowany w rozprawie problem badawczy dotyczy zatem możliwości wykorzystania technologii ALMM do budowy spójnego formalizmu modelowania i adaptacyjnego harmonogramowania zadań floty UAV w warunkach dynamicznych ograniczeń operacyjnych. Odpowiadająca temu problemowi teza zakłada możliwość wykorzystania ALMM jako podstawy formalnego modelowania i adaptacyjnego harmonogramowania zadań operacyjnych floty UAV w takich warunkach. Przyjęta teza ma charakter weryfikowalny, a sposób konstrukcji rozprawy umożliwia jej ocenę poprzez kolejne etapy formalizacji, implementacji algorytmicznej i badań eksperymentalnych.

W mojej ocenie cel główny, cele szczegółowe, problem badawczy oraz teza rozprawy tworzą logicznie spójny układ. Szczególnie wartościowe jest konsekwentne przejście od identyfikacji ograniczeń rzeczywistego problemu harmonogramowania, poprzez ich formalną reprezentację w modelach ALMM, do opracowania odpowiadających im procedur algorytmicznych i ich weryfikacji eksperymentalnej. Tak sformułowany program badawczy wykracza poza opracowanie pojedynczego algorytmu harmonogramowania i zmierza do stworzenia formalnych oraz implementacyjnych podstaw adaptacyjnego rozwiązywania określonej klasy problemów decyzyjnych.

3. Struktura i zawartość rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została opracowana w sposób przejrzysty, logiczny i zgodny z przyjętymi standardami prac naukowych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Układ rozprawy odzwierciedla kolejne etapy procesu badawczego, od sformułowania problemu i przedstawienia podstaw teoretycznych, poprzez charakterystykę rozpatrywanego problemu oraz konstrukcję jego modeli formalnych, następnie opracowanie metod i algorytmów rozwiązania, aż do badań eksperymentalnych, walidacji oraz sformułowania wniosków końcowych. Taki sposób organizacji materiału zapewnia spójność prowadzonych rozważań i pozwala na systematyczne śledzenie procesu przechodzenia od sformułowania problemu badawczego do jego formalnego, algorytmicznego i eksperymentalnego rozwiązania.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów merytorycznych, poprzedzonych spisem najważniejszych oznaczeń oraz uzupełnionych spisem rysunków, tabel i algorytmów oraz bibliografią. Przyjęta struktura odpowiada kolejnym etapom realizacji celu rozprawy i umożliwia stopniowe rozwijanie zaproponowanej koncepcji badawczej.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do problematyki badawczej. Autorka przedstawia motywację podjęcia badań, uzasadnia aktualność wybranego zagadnienia, formułuje cel oraz tezę rozprawy, a także prezentuje strukturę całej pracy.

Rozdział drugi przedstawia podstawy teoretyczne technologii ALMM, stanowiącej formalny fundament podejścia rozwijanego w rozprawie. Autorka wprowadza terminologię ALMM, omawia strukturę stanów i decyzji w wieloetapowym procesie decyzyjnym oraz przedstawia koncepcję i strukturę Inteligentnego ALMM Systemu. Rozdział uzupełniono przeglądem dotychczasowych zastosowań technologii ALMM, wskazującym zakres jej wykorzystania w problemach optymalizacji dyskretnej i wspomagania procesów decyzyjnych. Przedstawiony aparat pojęciowy i formalny stanowi podstawę konstrukcji modeli harmonogramowania zadań dla floty UAV zaprezentowanych w dalszej części rozprawy.

Rozdział trzeci poświęcono charakterystyce rozpatrywanego problemu harmonogramowania zadań realizowanych przez flotę UAV w obszarze okołolotniskowym. Autorka przedstawia specyfikę problemu harmonogramowania, charakteryzuje zasoby UAV, destynacje lotnicze, trajektorie realizacji zadań, sloty czasowe, dane dotyczące zadań lotniczych oraz występujące zakłócenia. Zdefiniowane w ten sposób uwarunkowania operacyjne oraz klasy ograniczeń czasowych, prze-

strzennych i zasobowych stanowią podstawę formalizacji problemu w strukturze modeli ALMM przedstawionych w kolejnym rozdziale.

Kluczową część rozprawy stanowi rozdział czwarty, w którym Autorka przedstawia formalne modele harmonogramowania oparte na technologii ALMM. Punktem wyjścia jest bazowy model ALMM harmonogramowania zadań dla floty UAV. Na jego podstawie Autorka konstruuje kolejne modele: ALMM-TS, uwzględniający ograniczenia dostępności czasowej UAV, ALMM-CS, uwzględniający dostępność korytarzy powietrznych, ALMM-TW, obejmujący okna czasowe zadań, oraz ALMM-D, przeznaczony do odwzorowania zakłóceń procesu harmonogramowania. Rozdział zamyka sformułowanie zadania optymalizacji dla opracowanych modeli ALMM. Przyjęta konstrukcja pozwala na zachowanie wspólnego rdzenia formalnego przy sukcesywnym rozszerzaniu reprezentacji problemu o kolejne klasy ograniczeń. Rozdział ten zawiera zasadniczą część oryginalnego wkładu naukowego rozprawy.

Rozdział piąty stanowi algorytmiczne rozwinięcie formalizmu przedstawionego w rozdziale czwartym. Autorka omawia własności problemu i wynikające z nich założenia algorytmiczne, przedstawia heurystykę redukcji przestrzeni decyzji, algorytm planowania zadań UAV z ograniczeniami korytarzy powietrznych, algorytm przydziału zadań do slotów czasowych oraz algorytm generowania trajektorii lotu UAV. Następnie przedstawiona zostaje architektura zintegrowanego systemu harmonogramowania zadań floty UAV oraz algorytmy dynamicznego harmonogramowania z predykcją zakłóceń i realokacją. Rozdział ten pokazuje przejście od formalnej reprezentacji procesu decyzyjnego do procedur umożliwiających praktyczną realizację procesu harmonogramowania w rozpatrywanych warunkach operacyjnych.

Rozdział szósty zawiera wyniki badań eksperymentalnych służących weryfikacji i walidacji opracowanych modeli, algorytmów oraz systemu. Po przedstawieniu środowiska i zakresu walidacji eksperymentalnej Autorka analizuje wyniki bazowych eksperymentów symulacyjnych harmonogramowania zadań UAV, a następnie eksperymentów uwzględniających ograniczenia czasowe korytarzy. Osobną część poświęcono walidacji modelu ALMM-D w warunkach dynamicznych zakłóceń zasobowych i zadaniowych. Badania uzupełniono walidacją opracowanego systemu w warunkach zbliżonych do rzeczywistych oraz analizą porównawczą uzyskanych rezultatów z innymi podejściami. Przeprowadzone eksperymenty pozwalają na ocenę właściwości opracowanego rozwiązania w różnych warunkach realizacji procesu harmonogramowania.

W rozdziale siódmym Autorka dokonuje syntezy przeprowadzonych badań, odnosi uzyskane rezultaty do sformułowanego celu i tezy rozprawy, przedstawia najważniejsze osiągnięcia oraz wskazuje ograniczenia opracowanego podejścia i możliwe kierunki dalszych badań.

W mojej ocenie struktura rozprawy została zaprojektowana prawidłowo. Poszczególne rozdziały nie stanowią odrębnych części tematycznych, lecz tworzą logiczny ciąg badawczy: sformułowanie problemu badawczego i jego przesłanek, przedstawienie podstaw formalnych technologii ALMM, charakterystyka uwarunkowań operacyjnych problemu harmonogramowania UAV, konstrukcja modeli ALMM, opracowanie odpowiadających im metod i algorytmów, a następnie ich weryfikacja i walidacja eksperymentalna. Szczególnie właściwe jest powiązanie rozdziałów czwartego i piątego, w których formalna konstrukcja modeli znajduje bezpośrednie rozwinięcie w postaci odpowiadających im procedur algorytmicznych.

Na podkreślenie zasługuje również zachowanie właściwych proporcji pomiędzy częścią przedstawiającą podstawy teoretyczne i charakterystykę problemu a częścią stanowiącą oryginalny wkład naukowy Autorki. Zasadniczy ciężar rozprawy został skoncentrowany na formalizacji problemu, konstrukcji modeli ALMM, opracowaniu metod i algorytmów ich wykorzystania oraz eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanego rozwiązania, co odpowiada charakterowi i celowi rozprawy doktorskiej w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

4. Ocena merytoryczna rozprawy

4.1. Ocena części teoretycznej

Część teoretyczna rozprawy obejmuje zarówno przedstawienie podstaw technologii ALMM i formalizację rozpatrywanego problemu harmonogramowania, jak również, co w mojej ocenie stanowi jej zasadniczy element, autorską konstrukcję kaskady modeli ALMM przedstawioną w rozdziale czwartym. Przyjęty sposób prowadzenia wywodu pozwala na przejście od ogólnego aparatu formalnego, poprzez identyfikację struktury analizowanego problemu i występujących w nim ograniczeń, do kolejnych modeli opisujących coraz bardziej złożone warunki realizacji zadań przez flotę UAV.

Podstawę formalną rozważań stanowi reprezentacja procesu decyzyjnego ALMM w postaci $P = (U, S, s_0, f, S_N, S_G)$, obejmująca przestrzeń decyzji, przestrzeń stanów, stan początkowy, funkcję przejścia oraz zbiory stanów niedopuszczalnych i docelowych. W odniesieniu do analizowanego problemu Autorka konstruuje stan procesu $s = (x, t)$, w którym stan właściwy $x = (x^0, x^1, \ldots, x^m)$ zawiera zarówno informację o zbiorze zadań już ukończonych, reprezentowanym przez współrzędną x^0, jak również informacje o stanie poszczególnych jednostek UAV. Stan k-tego UAV opisano jako $x^k = (\beta^k, \tau^k)$, gdzie β^k identyfikuje aktualnie realizowane zadanie, natomiast τ^k określa pozostały czas jego realizacji. Konstrukcja ta umożliwia formalne odwzorowanie ewolucji procesu harmonogramowania oraz generowanie trajektorii stanów odpowiadających kolejnym decyzjom podejmowanym w systemie.

Za szczególnie wartościowy element rozprawy uważam sposób rozwinięcia modelu bazowego w postaci kaskady modeli ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D. Kolejne modele nie stanowią niezależnych formalizacji tego samego problemu, lecz sukcesywnie rozszerzają wspólny rdzeń modelowy o następne klasy ograniczeń. Model ALMM-TS uwzględnia ograniczoną dostępność czasową zasobów UAV opisaną za pomocą slotów dostępności, ALMM-CS rozszerza formalizm o ograniczenia związane z wykorzystaniem i współdzieleniem korytarzy powietrznych, natomiast ALMM-TW wprowadza wymagania wynikające z okien czasowych realizacji zadań. Ostatni element kaskady ALMM-D, uwzględnia zakłócenia ujawniające się w trakcie realizacji procesu i umożliwia odpowiednią modyfikację zbioru decyzji dopuszczalnych oraz rekonfigurację dalszego przebiegu harmonogramu.

Istotną zaletą takiej konstrukcji jest zachowanie spójności formalnej pomiędzy poszczególnymi poziomami kaskady. Rozszerzenie zakresu modelowanego problemu nie wymaga każdorazowego konstruowania od podstaw nowego aparatu pojęciowego, lecz odbywa się poprzez odpowiednią modyfikację lub rozszerzenie elementów istniejącego modelu, w szczególności warunków dopuszczalności decyzji i stanów procesu. Dzięki temu zależność pomiędzy poszczególnymi modelami jest czytelna, a wpływ kolejnych klas ograniczeń na proces decyzyjny może być analizowany w sposób systematyczny.

Na podkreślenie zasługuje również model ALMM-D, w którym Autorka przechodzi od problemu wyznaczenia harmonogramu w zadanych warunkach do problemu jego adaptacji w odpowiedzi na zakłócenia operacyjne. Wprowadzenie zbioru możliwych zakłóceń $\mathcal{D}$ oraz zakłócenia δ_i ujawnianego w określonym kroku procesu pozwala uwzględnić między innymi zmiany dostępności jednostek UAV, warunków realizacji zadań oraz dostępności przestrzeni operacyjnej. Formalizm zachowuje przy tym informację o aktualnie osiągniętym stanie procesu, co umożliwia rekonfigurację jego przyszłego przebiegu zamiast ponownego rozwiązywania problemu bez uwzględnienia wcześniej zrealizowanych decyzji. Uważam ten element za szczególnie istotny z punktu widzenia adaptacyjnego charakteru zaproponowanego podejścia.

Kaskadowa konstrukcja modeli ma również znaczenie wykraczające poza formalny opis konkretnego przypadku zastosowania. Zachowanie wspólnego rdzenia modelowego i sukcesywne dołączanie kolejnych mechanizmów ograniczeń tworzy naturalne przesłanki do komponentowej realizacji technologii ALMM. Poszczególne klasy ograniczeń mogą być traktowane jako wyspecjalizowane rozszerzenia modelu bazowego, co sprzyja zastosowaniu paradygmatu obiektowego oraz budowie modularnej biblioteki komponentów przeznaczonych do konstruowania modeli różnych

klas problemów decyzyjnych. Rozprawa nie przedstawia kompletnej biblioteki tego rodzaju, jednak przyjęta architektura formalna stanowi w mojej ocenie wartościową podstawę do takiego kierunku dalszego rozwoju technologii ALMM.

Pozytywnie oceniam również powiązanie części teoretycznej z formalizacją rzeczywistych uwarunkowań analizowanego problemu. Ograniczenia wynikające z dostępności jednostek UAV, slotów czasowych, korytarzy powietrznych, okien czasowych oraz zakłóceń nie zostały jedynie przedstawione opisowo, lecz znajdują swoje odwzorowanie w strukturze kolejnych modeli. Dzięki temu formalizm zachowuje interpretowalność, a poszczególnym jego elementom można przypisać konkretne znaczenie w analizowanym procesie harmonogramowania.

W mojej ocenie część teoretyczna rozprawy została opracowana na wysokim poziomie. Autorka wykazuje umiejętność posługiwania się formalnym aparatem modelowania procesów decyzyjnych, jego świadomej adaptacji do rozpatrywanego problemu oraz systematycznego rozszerzania w odpowiedzi na kolejne klasy ograniczeń. Za najważniejszą wartość tej części rozprawy uważam nie samo zastosowanie technologii ALMM do problemu harmonogramowania floty UAV, lecz opracowanie spójnej kaskady modeli, w której wzrost złożoności problemu znajduje bezpośrednie i kontrolowane odzwierciedlenie w strukturze formalnej modelu. Stanowi to solidną podstawę dla algorytmicznej implementacji przedstawionej w kolejnym rozdziale rozprawy.

4.2. Ocena metodyki badań

Metodyka badań przedstawiona w rozprawie została opracowana w sposób konsekwentny i odpowiada charakterowi rozwiązywanego problemu naukowego. Autorka przyjęła podejście prowadzące od identyfikacji i formalizacji ograniczeń rzeczywistego procesu harmonogramowania, poprzez konstrukcję kolejnych modeli ALMM, następnie ich odwzorowanie w postaci procedur algorytmicznych, aż do eksperymentalnej weryfikacji uzyskanego rozwiązania. Taki sposób organizacji badań pozwala zachować ciągłość pomiędzy warstwą problemową, formalną, algorytmiczną i eksperymentalną.

Za szczególnie właściwą metodologicznie uważam przyjętą strategię stopniowego zwiększania złożoności modelowanego problemu. Punktem wyjścia jest model bazowy, w którym zdefiniowano podstawowe mechanizmy przydziału i realizacji zadań przez flotę UAV. Kolejne modele ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D wprowadzają następne klasy ograniczeń bez naruszania zasadniczej struktury formalnej procesu. Umożliwia to analizę wpływu poszczególnych ograniczeń na zbiór decyzji dopuszczalnych i przebieg generowanych trajektorii procesu, a jednocześnie ogranicza ryzyko utraty spójności formalnej przy zwiększaniu złożoności rozwiązywanego problemu.

Istotnym elementem przyjętej metodyki jest wykorzystanie trajektorii procesu jako podstawowego mechanizmu reprezentacji kolejnych etapów realizacji harmonogramu. Sekwencja podejmowanych decyzji prowadzi do kolejnych stanów procesu, dzięki czemu możliwe jest nie tylko wyznaczenie końcowego przydziału zadań, lecz również analiza sposobu dochodzenia do rozwiązania oraz kontrola jego dopuszczalności na kolejnych etapach realizacji. Ma to szczególne znaczenie w modelach rozszerzonych, w których zmiana dostępności zasobów, przestrzeni operacyjnej lub pojawienie się zakłócenia może wymagać modyfikacji dalszej części trajektorii.

Bardzo wysoko oceniam powiązanie modeli formalnych przedstawionych w rozdziale czwartym z ich algorytmiczną realizacją w rozdziale piątym. Autorka nie ogranicza się do wykazania możliwości formalnego opisu problemu, lecz opracowuje procedury umożliwiające praktyczne generowanie harmonogramów zgodnie z warunkami dopuszczalności wynikającymi z poszczególnych modeli kaskady. W ten sposób abstrakcyjne elementy formalizmu ALMM uzyskują bezpośrednią interpretację obliczeniową, a funkcja przejścia, zbiory decyzji dopuszczalnych oraz mechanizmy obsługi kolejnych ograniczeń stają się elementami wykonywalnego procesu harmonogramowania.

Szczególnie istotny z metodologicznego punktu widzenia jest sposób rozwiązania problemu dynamicznych zmian warunków operacyjnych. W modelu ALMM-D zakłócenie $\delta_i \in \mathcal{D}$ jest odnoszone do aktualnego stanu procesu s_i, a dalsze decyzje mogą być wyznaczane z uwzględnieniem

zmienionych warunków realizacji zadań. Pozwala to zachować wykonaną już część harmonogramu i rekonfigurować jego przyszły segment. Przyjęcie takiego mechanizmu jest metodologicznie uzasadnione, ponieważ odpowiada rzeczywistemu charakterowi procesów operacyjnych, w których pojawienie się zakłócenia nie powoduje anulowania historii procesu, lecz wymaga podjęcia nowych decyzji na podstawie aktualnie osiągniętego stanu.

Wartością przyjętej metodyki jest również jej modularny charakter. Kolejne poziomy kaskady odpowiadają wyodrębnionym klasom ograniczeń, a ich algorytmiczna realizacja zachowuje strukturę wynikającą ze wspólnego modelu bazowego. Takie rozwiązanie sprzyja separacji odpowiedzialności poszczególnych komponentów i umożliwia niezależne rozwijanie mechanizmów odpowiedzialnych za określone rodzaje ograniczeń. Z punktu widzenia inżynierii oprogramowania stwarza to naturalne warunki do implementacji obiektowej, w której wspólne elementy formalizmu mogą zostać odwzorowane w komponentach bazowych, natomiast kolejne klasy ograniczeń w ich wyspecjalizowanych rozszerzeniach. W dalszej perspektywie podejście takie może stanowić podstawę budowy biblioteki komponentów ALMM wspierającej konstruowanie rozwiązań dla szerszej klasy problemów decyzyjnych.

Metodyka weryfikacji została podporządkowana strukturze opracowanej kaskady modeli. Kolejne scenariusze eksperymentalne pozwalają oceniać działanie rozwiązania w warunkach odpowiadających wprowadzanym klasom ograniczeń, a następnie analizować zachowanie systemu w sytuacjach wymagających adaptacji harmonogramu. Takie powiązanie modelu, algorytmu i scenariusza eksperymentalnego ułatwia interpretację uzyskanych wyników oraz ocenę, czy obserwowane zachowanie jest zgodne z założeniami formalnymi.

Za wartościowe uważam również wykorzystanie w procesie walidacji danych i scenariuszy inspirowanych rzeczywistymi warunkami operacyjnymi. Zwiększa to wiarygodność przeprowadzonych eksperymentów i pozwala oceniać opracowane rozwiązanie nie tylko w abstrakcyjnych przypadkach testowych, lecz również w warunkach odpowiadających praktycznym ograniczeniom funkcjonowania systemów UAV.

Pewnym ograniczeniem przyjętej metodyki jest stosunkowo ograniczony zakres bezpośrednich porównań ilościowych z alternatywnymi metodami harmonogramowania. Szersze eksperymenty porównawcze, obejmujące większą liczbę instancji problemu i reprezentatywne algorytmy referencyjne, umożliwiłyby dokładniejsze określenie relacji pomiędzy jakością uzyskiwanych harmonogramów, czasem obliczeń oraz kosztem adaptacji do zmian warunków operacyjnych. Ograniczenie to nie podważa jednak poprawności przyjętej metodyki, ponieważ zasadniczym celem rozprawy jest opracowanie i weryfikacja formalnej technologii modelowania oraz adaptacyjnego harmonogramowania, a nie przeprowadzenie wyłącznie benchmarkowego porównania algorytmów optymalizacyjnych.

Podsumowując, metodykę badań oceniam wysoko. Jej szczególną wartością jest konsekwentne powiązanie formalizacji problemu, kaskadowej konstrukcji modeli, ich realizacji algorytmicznej oraz weryfikacji eksperymentalnej. Autorka nie ogranicza się do zaproponowania pojedynczego algorytmu rozwiązującego określony wariant problemu, lecz buduje metodyczne podstawy rozwijania rozwiązania wraz ze wzrostem złożoności ograniczeń. Takie podejście jest spójne z postawionym problemem badawczym i stanowi właściwą podstawę do oceny osiągnięcia celu oraz weryfikacji tezy rozprawy.

4.3. Ocena wyników badań

Badania eksperymentalne przedstawione w rozprawie stanowią logiczne dopełnienie części formalnej i algorytmicznej. Ich zasadniczym celem jest weryfikacja, czy opracowana kaskada modeli ALMM oraz odpowiadające jej procedury algorytmiczne umożliwiają generowanie dopuszczalnych harmonogramów w warunkach kolejno wprowadzanych ograniczeń operacyjnych, a w przypadku wystąpienia zakłóceń – rekonfigurację dalszego przebiegu procesu. Przyjęta organizacja eksperymentów odpowiada strukturze modeli przedstawionych w rozdziale czwartym, co umożliwia bezpośrednie odniesienie uzyskiwanych wyników do poszczególnych elementów zaproponowanego formalizmu.

Pozytywnie oceniam sposób konstruowania scenariuszy eksperymentalnych. Badania prowadzone są dla kolejnych poziomów złożoności problemu, dzięki czemu możliwe jest obserwowanie wpływu wprowadzanych ograniczeń na przebieg procesu harmonogramowania. Autorka analizuje między innymi przypadki ograniczonej dostępności czasowej zasobów, wykorzystania korytarzy powietrznych, występowania okien czasowych oraz zmian warunków operacyjnych wymagających rekonfiguracji harmonogramu. Taki sposób organizacji eksperymentów pozwala ocenić nie tylko końcowy rezultat harmonogramowania, lecz również zachowanie modelu w kolejnych stanach procesu.

Za wartościowe uważam przedstawienie wyników w postaci trajektorii procesu oraz odpowiadających im harmonogramów. Umożliwia to śledzenie kolejnych decyzji, zmian stanu systemu i momentów realizacji poszczególnych zadań, a tym samym weryfikację zgodności rozwiązania z ograniczeniami formalnie zdefiniowanymi w modelu. Szczególnie istotne jest wykazanie, że kolejne rozszerzenia kaskady zachowują możliwość generowania trajektorii dopuszczalnych także w sytuacji ograniczonej i fragmentarycznej dostępności zasobów oraz przestrzeni operacyjnej.

Wyniki uzyskane dla modelu ALMM-TS potwierdzają możliwość uwzględniania przedziałowej dostępności zasobów UAV w procesie harmonogramowania. Wprowadzenie slotów dostępności wpływa na momenty podejmowania kolejnych decyzji oraz możliwość realizacji poszczególnych zadań, przy zachowaniu formalnych warunków dopuszczalności trajektorii. Wyniki te stanowią istotny etap walidacji, ponieważ pokazują przejście od modelu bazowego do procesu, w którym dostępność zasobu nie jest już traktowana jako niezmienna w całym horyzoncie harmonogramowania.

Eksperymenty dotyczące modelu ALMM-CS pokazują zdolność rozwiązania do uwzględniania ograniczeń wynikających z dostępności korytarzy powietrznych. Na uwagę zasługuje wykorzystanie również krótkich i rozproszonych przedziałów dostępności oraz możliwość przypisywania jednostek UAV do dostępnych korytarzy zgodnie z aktualnym stanem procesu. Uzyskane harmonogramy pokazują, że fragmentacja dostępności przestrzeni nie musi prowadzić do utraty wykonalności całego zbioru zadań, o ile istnieje trajektoria spełniająca zdefiniowane warunki dopuszczalności. Wyniki te dobrze ilustrują praktyczne znaczenie formalnego mechanizmu ograniczania przestrzeni decyzji.

Model ALMM-TW poddano weryfikacji w scenariuszach, w których realizacja zadań podlega dodatkowym ograniczeniom wynikającym z ich okien czasowych. Eksperymenty pokazują, że wprowadzenie najwcześniejszych dopuszczalnych momentów rozpoczęcia oraz najpóźniejszych momentów zakończenia zadań może zostać uwzględnione w ramach tej samej struktury procesu decyzyjnego. Jest to istotne, ponieważ zwiększenie złożoności warunków realizacji zadań nie wymaga zmiany podstawowej koncepcji modelowania, lecz prowadzi do odpowiedniego zawężenia zbioru decyzji dopuszczalnych.

Szczególnie interesujące są wyniki dotyczące modelu ALMM-D, ponieważ odnoszą się bezpośrednio do adaptacyjnego charakteru zaproponowanego rozwiązania. Analizowane scenariusze obejmują między innymi awarię jednostki UAV, anulowanie zadania oraz pojawienie się nowego zadania w trakcie realizacji procesu. Uzyskane rezultaty pokazują możliwość zachowania zrealizowanej części harmonogramu i wyznaczenia nowego przebiegu jego przyszłego segmentu na podstawie aktualnego stanu systemu i zmienionych warunków operacyjnych. W mojej ocenie wyniki te stanowią szczególnie istotny element eksperymentalnego uzasadnienia tezy rozprawy, ponieważ pokazują, że opracowany formalizm nie ogranicza się do statycznego generowania harmonogramu, lecz umożliwia jego rekonfigurację w odpowiedzi na zdarzenia występujące podczas realizacji procesu.

Pozytywnie oceniam również sposób prezentacji wyników. Zestawienie reprezentacji tabelarycznych z graficzną prezentacją harmonogramów i trajektorii ułatwia prześledzenie wpływu kolejnych ograniczeń na podejmowane decyzje. W przypadku formalnego modelu wieloetapowego procesu decyzyjnego ma to szczególne znaczenie, ponieważ pozwala czytelnikowi analizować nie tylko wartości wybranych wskaźników końcowych, ale również sam mechanizm uzyskania rozwią-

zania. Wyniki eksperymentalne potwierdzają przede wszystkim poprawność funkcjonalną opracowanych modeli i algorytmów oraz ich zdolność do generowania rozwiązań zgodnych z przyjętymi ograniczeniami. Pokazują również, że kaskadowe rozszerzanie modelu pozwala zachować wspólny mechanizm procesu decyzyjnego przy wprowadzaniu kolejnych klas ograniczeń. W tym sensie część eksperymentalna dobrze koresponduje z konstrukcją formalną przedstawioną w rozdziale czwartym oraz jej implementacją algorytmiczną przedstawioną w rozdziale piątym.

Pewien niedosyt pozostawia zakres ilościowej oceny skalowalności oraz porównań z alternatywnymi metodami harmonogramowania. Rozszerzenie eksperymentów o systematyczne badania zależności czasu obliczeń i jakości rozwiązania od liczby zadań, liczebności floty oraz stopnia fragmentacji przestrzeni dopuszczalnych decyzji pozwoliłoby dokładniej określić granice praktycznej stosowalności rozwiązania. Podobnie szersze porównanie z reprezentatywnymi metodami optymalizacyjnymi i metaheurystycznymi umożliwiłoby bardziej jednoznaczną ocenę przewagi ilościowej proponowanego podejścia. Uwagi te traktuję jednak jako wskazanie wartościowych kierunków rozszerzenia badań, a nie jako podważenie poprawności przedstawionej walidacji.

Podsumowując, wyniki badań eksperymentalnych oceniam wysoko. Przeprowadzone eksperymenty potwierdzają możliwość praktycznej realizacji formalizmu opracowanego w rozprawie, poprawne uwzględnianie kolejnych klas ograniczeń oraz zdolność do rekonfiguracji harmonogramu w odpowiedzi na wybrane zakłócenia operacyjne. Szczególnie wartościowa jest zgodność pomiędzy strukturą kaskady modeli, odpowiadającymi jej algorytmami oraz scenariuszami eksperymentalnymi. Wyniki przeprowadzonych eksperymentów, rozpatrywane łącznie z formalną konstrukcją modeli oraz ich algorytmiczną realizacją, dostarczają podstaw do **pozytywnej weryfikacji postawionej w rozprawie tezy badawczej**.

4.4. Oryginalność oraz wkład naukowy

Oryginalność rozprawy wynika przede wszystkim ze sposobu adaptacji i rozwinięcia technologii ALMM na potrzeby formalnego modelowania oraz adaptacyjnego harmonogramowania zadań realizowanych przez flotę UAV w warunkach dynamicznych ograniczeń operacyjnych. Za istotne uważam przy tym rozróżnienie pomiędzy wykorzystaniem istniejących podstaw formalizmu ALMM a autorskim wkładem Doktorantki, który polega na skonstruowaniu modeli odwzorowujących specyfikę rozpatrywanego problemu, ich sukcesywnym rozszerzaniu, opracowaniu odpowiadających im mechanizmów algorytmicznych oraz przeprowadzeniu ich eksperymentalnej weryfikacji.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć naukowych rozprawy zaliczam:

1. **Formalizację problemu harmonogramowania zadań floty UAV w ramach technologii ALMM.** Autorka opracowała reprezentację procesu decyzyjnego uwzględniającą strukturę zadań i zasobów UAV, stan realizacji procesu, dopuszczalność podejmowanych decyzji oraz warunki osiągnięcia stanów docelowych. Szczególnie istotne jest takie odwzorowanie problemu, które umożliwia analizę nie tylko końcowego harmonogramu, lecz całej trajektorii procesu decyzyjnego i zmian zachodzących w jego kolejnych stanach.
2. **Opracowanie kaskadowej architektury modeli ALMM.** Model bazowy został sukcesywnie rozszerzony do postaci ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D, odpowiadających kolejnym klasom ograniczeń występujących w analizowanym środowisku operacyjnym. Konstrukcja ta pozwala uwzględniać odpowiednio ograniczoną dostępność czasową zasobów, dostępność i wykorzystanie korytarzy powietrznych, okna czasowe realizacji zadań oraz zakłócenia pojawiające się podczas realizacji procesu. Za szczególnie wartościowe uważam zachowanie wspólnego rdzenia formalnego kolejnych modeli. Rozszerzanie zakresu problemu odbywa się dzięki wprowadzaniu odpowiednich warunków i mechanizmów do istniejącej struktury, a nie poprzez tworzenie niezależnych modeli dla poszczególnych wariantów problemu.
3. **Opracowanie mechanizmu adaptacyjnej rekonfiguracji harmonogramu.** W modelu ALMM-D Autorka uwzględniła możliwość pojawienia się zakłócenia $\delta_i \in \mathcal{D}$ w trakcie

realizacji procesu i powiązała dalszy proces decyzyjny z aktualnie osiągniętym stanem s_i. Umożliwia to zachowanie zrealizowanej części harmonogramu i rekonfigurację jego przyszłego segmentu w odpowiedzi na zmianę warunków operacyjnych. Rozwiązanie to ma istotne znaczenie dla systemów UAV, w których dostępność zasobów, zadań lub przestrzeni operacyjnej może zmieniać się już podczas wykonywania misji.

4. **Opracowanie algorytmicznej realizacji zaproponowanych modeli.** Istotnym osiągnięciem rozprawy jest przełożenie formalnych konstrukcji przedstawionych w rozdziale czwartym na wykonywalne procedury opisane w rozdziale piątym. Algorytmy umożliwiają generowanie trajektorii procesu, konstrukcję harmonogramów zgodnych z warunkami dopuszczalności poszczególnych modeli oraz ich rekonfigurację w przypadku zmian warunków realizacji. Dzięki temu zaproponowana koncepcja nie pozostaje wyłącznie formalnym opisem problemu, lecz tworzy podstawę jego praktycznego rozwiązania.
5. **Zaproponowanie rozszerzalnej i modularnej architektury modelowania problemów decyzyjnych.** Kaskadowa organizacja modeli, zachowanie ich wspólnego rdzenia oraz wyodrębnienie mechanizmów odpowiadających poszczególnym klasom ograniczeń nadają opracowanemu podejściu charakter komponentowy. W mojej ocenie jest to istotna właściwość zaproponowanego rozwiązania, ponieważ stwarza naturalne podstawy do zastosowania paradygmatu obiektowego, w którym model bazowy i kolejne klasy ograniczeń mogą być odwzorowane jako współpracujące lub dziedziczące komponenty programowe. Otwiera to możliwość dalszego rozwoju technologii w kierunku biblioteki komponentów ALMM, pozwalającej konstruować modele dla różnych klas problemów decyzyjnych poprzez odpowiednią kompozycję dostępnych mechanizmów. Należy przy tym zaznaczyć, że kompletna biblioteka tego rodzaju nie stanowi rezultatu przedstawionego w rozprawie, lecz jest naturalnym kierunkiem rozwoju wynikającym z zaproponowanej architektury.

Za szczególnie istotny element wkładu naukowego uważam wzajemne powiązanie wymienionych osiągnięć. Wartość rozprawy nie wynika bowiem wyłącznie z opracowania kolejnych wariantów modelu ani z zastosowania technologii ALMM do nowego obszaru aplikacyjnego. Autorka przedstawia spójną drogę od formalizacji problemu, poprzez konstrukcję kaskady modeli odpowiadających kolejnym klasom ograniczeń, do ich algorytmicznej realizacji i eksperymentalnej weryfikacji. Powoduje to, że rezultat rozprawy można rozpatrywać jako metodyczne podejście do konstruowania adaptacyjnych modeli harmonogramowania, a nie jedynie jako pojedyncze rozwiązanie dla ustalonego scenariusza działania floty UAV.

W mojej ocenie przedstawione osiągnięcia mają charakter oryginalny i stanowią istotny wkład w obszar formalnego modelowania i algorytmizacji dynamicznych procesów decyzyjnych. Na szczególne podkreślenie zasługuje połączenie formalnej precyzji technologii ALMM z możliwością stopniowego rozszerzania modelu oraz jego bezpośredniej realizacji algorytmicznej. Opracowana koncepcja posiada jednocześnie potencjał dalszej generalizacji na inne problemy harmonogramowania i alokacji zasobów, w których przestrzeń decyzji dopuszczalnych zmienia się wraz ze stanem procesu i występującymi ograniczeniami.

4.5. Ocena strony redakcyjnej rozprawy

Rozprawa została przygotowana starannie pod względem redakcyjnym i edytorskim. Jej układ jest przejrzysty, a zastosowany podział na rozdziały i podrozdziały odpowiada logice prowadzonych rozważań. Kolejne części pracy są właściwie wyodrębnione, a rozbudowany spis treści ułatwia orientację w strukturze rozprawy. Pozytywnie oceniam również zamieszczenie wykazu najważniejszych oznaczeń i skrótów, spisów rysunków, tabel i algorytmów oraz bibliografii.

Język rozprawy jest poprawny, rzeczowy i dostosowany do charakteru pracy naukowej z zakresu informatyki technicznej i telekomunikacji. Autorka sprawnie posługuje się terminologią dotyczącą harmonogramowania, bezzałogowych statków powietrznych oraz ALMM. Pomimo znacznego stopnia formalizacji prezentowanego rozwiązania wywód pozostaje zasadniczo czytelny, a przyjęty sposób narracji pozwala na prześledzenie kolejnych etapów prowadzących od

sformułowania problemu, poprzez konstrukcję modeli i ich implementację algorytmiczną, do badań eksperymentalnych.

Na pozytywną ocenę zasługuje sposób prezentacji aparatu formalnego rozprawy. Autorka konsekwentnie wykorzystuje wspólną strukturę pojęciową modeli ALMM, co jest szczególnie istotne w rozdziale czwartym, gdzie kolejne modele ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D powstają poprzez sukcesywne rozszerzanie modelu bazowego. Zachowanie wspólnej konwencji oznaczeń ułatwia identyfikację elementów pozostających niezmiennymi składnikami formalizmu oraz tych, które odpowiadają za wprowadzenie kolejnych klas ograniczeń.

Wprowadzone symbole matematyczne są w zdecydowanej większości jednoznacznie zdefiniowane i konsekwentnie stosowane. Ze względu na rozbudowany aparat formalny szczególnie przydatny jest zamieszczony w rozprawie wykaz oznaczeń, pozwalający rozróżnić między innymi stan procesu i jego składowe, zbiory decyzji dopuszczalnych oraz oznaczenia właściwe dla kolejnych modeli kaskady. W pojedynczych miejscach można wskazać drobne niejednoznaczności terminologiczne lub notacyjne, wynikające przede wszystkim z dużej liczby wzajemnie powiązanych symboli. Mają one jednak charakter redakcyjny i nie utrudniają zrozumienia istoty zaproponowanego formalizmu.

Istotnym elementem wspomagającym interpretację części formalnej jest sposób prezentacji wyników za pomocą tabel, diagramów i graficznych reprezentacji harmonogramów. W szczególności wizualizacja trajektorii procesu oraz wykorzystania przedziałów dostępności zasobów i przestrzeni operacyjnej ułatwia powiązanie formalnych warunków dopuszczalności z ich praktycznymi konsekwencjami dla generowanego harmonogramu. Również pseudokody algorytmów przedstawionych w rozdziale piątym stanowią właściwe uzupełnienie modeli matematycznych i pozwalają czytelnikowi prześledzić sposób ich realizacji obliczeniowej.

Bibliografia została dobrana prawidłowo i obejmuje zarówno pozycje dotyczące podstaw teoretycznych wykorzystywanych metod, jak i współczesne prace związane z harmonogramowaniem, systemami UAV oraz metodami wspomagania decyzji. Odwołania literaturowe zostały rozmieszczone w sposób wspierający prowadzony wywód i umożliwiają odniesienie zaproponowanego rozwiązania do istniejącego stanu wiedzy.

Pod względem edytorskim rozprawa prezentuje bardzo dobry poziom. Rysunki, tabele, równania oraz algorytmy zostały odpowiednio ponumerowane i są przywoływane w tekście. Rozbudowana struktura pracy i duża liczba elementów formalnych powodują miejscami pewną nadmiarowość opisów oraz powtórzenia informacji wprowadzanych wcześniej, jednak nie wpływa to w istotny sposób na czytelność rozprawy. Ewentualne uchybienia redakcyjne mają charakter lokalny i nie wpływają na wartość merytoryzną rozprawy.

Podsumowując, stronę redakcyjną rozprawy oceniam pozytywnie. Na szczególne podkreślenie zasługuje uporządkowany sposób prezentacji rozbudowanego formalizmu matematycznego oraz zachowanie spójnej konwencji opisu kolejnych modeli kaskady ALMM. Drobne uwagi dotyczące terminologii, oznaczeń i miejscowej nadmiarowości wywodu nie wpływają na jednoznacznie pozytywną ocenę jakości redakcyjnej rozprawy.

5. Uwagi krytyczne i pytania

Przedstawiona rozprawa doktorska została przygotowana na wysokim poziomie naukowym i stanowi spójne oraz wartościowe opracowanie dotyczące zastosowania technologii ALMM w problemie inteligentnego harmonogramowania zadań realizowanych przez flotę bezzałogowych statków powietrznych. Przeprowadzona analiza rozprawy nie ujawniła istotnych uchybień merytorycznych, które mogłyby podważyć poprawność zaproponowanego podejścia lub wartość naukową uzyskanych rezultatów. Poniższe uwagi mają przede wszystkim charakter dyskusyjny i wskazują zagadnienia, których rozwinięcie pozwoliłoby jeszcze pełniej określić możliwości oraz granice stosowalności opracowanej koncepcji.

Pierwsza uwaga dotyczy zakresu eksperymentalnej oceny skalowalności rozwiązania. Przedstawione scenariusze umożliwiają szczegółową analizę działania kolejnych modeli kaskady oraz

zachowania rozwiązania dla różnych konfiguracji problemu. Interesującym uzupełnieniem badań byłaby jednak bardziej systematyczna charakterystyka skalowalności obliczeniowej, obejmująca wpływ liczby zadań, liczebności floty UAV, liczby aktywnych ograniczeń oraz stopnia redukcji zbioru decyzji dopuszczalnych na czas obliczeń i jakość uzyskiwanych harmonogramów. Pozwoliłoby to dokładniej określić praktyczne granice stosowalności opracowanego rozwiązania.

Druga uwaga odnosi się do zakresu badań porównawczych. Przedstawione w rozprawie eksperymenty dobrze dokumentują skuteczność funkcjonalną zaproponowanych modeli i algorytmów, natomiast szersze porównanie ilościowe z reprezentatywnymi metodami optymalizacyjnymi, metaheurystycznymi lub innymi metodami dynamicznego harmonogramowania umożliwiłoby dokładniejsze określenie relacji pomiędzy jakością harmonogramu, czasem jego wyznaczania oraz kosztem rekonfiguracji po wystąpieniu zakłócenia. Uwaga ta nie podważa przeprowadzonej walidacji, lecz wskazuje naturalny kierunek dalszych badań.

Trzecia uwaga dotyczy szczególnie interesującej właściwości zaproponowanej kaskady modeli. Modele ALMM, ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D zachowują wspólny rdzeń formalny, a kolejne poziomy wprowadzają wyspecjalizowane mechanizmy odpowiadające określonym klasom ograniczeń. Taka organizacja dobrze wpisuje się w komponentowy charakter technologii ALMM i wskazuje na możliwość rozwinięcia przedstawionej kaskady w kierunku modułowej implementacji programowej, w której poszczególne mechanizmy ograniczeń mogłyby być rozwijane i wykorzystywane jako niezależne komponenty. Rozprawa nie rozwija tego zagadnienia do postaci kompletnej biblioteki programowej, jednak w mojej ocenie stanowi ono interesującą konsekwencję przyjętej architektury i wartościowy kierunek dalszych prac.

Czwarta uwaga związana jest z mechanizmem rekonfiguracji w modelu ALMM-D. Przedstawione wyniki pokazują możliwość zachowania wykonanej części harmonogramu i modyfikacji jego przyszłego segmentu po wystąpieniu zakłócenia. Interesujące byłoby jednak szersze określenie warunków, w których rekonfiguracja wyłącznie niewykonanej części harmonogramu pozostaje wystarczająca, oraz sytuacji, w których charakter lub skala zakłócenia mogłyby wymagać ponownego wyznaczenia większej części trajektorii procesu albo całego harmonogramu.

Uwagi te nie wpływają na moją pozytywną ocenę rozprawy, lecz wskazują możliwe kierunki dalszych badań oraz rozwoju przedstawionej technologii.

W związku z powyższym proszę Autorkę o odniesienie się podczas publicznej obrony do następujących zagadnień:

1. Jedną z istotnych cech zaproponowanego rozwiązania jest kaskadowa konstrukcja modeli ALMM, ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D. Jakie właściwości formalizmu ALMM umożliwiają zachowanie wspólnego rdzenia modelu przy sukcesywnym wprowadzaniu kolejnych klas ograniczeń? Czy istnieją, zdaniem Autorki, takie rodzaje ograniczeń lub zależności pomiędzy nimi, których włączenie do zaproponowanej struktury byłoby szczególnie trudne?
2. W modelu ALMM-D zakłócenie $\delta_i \in \mathcal{D}$ pojawia się w określonym stanie procesu s_i, a dalsza część harmonogramu może zostać odpowiednio zrekonfigurowana. Jakie warunki muszą być spełnione, aby rekonfiguracja niewykonanej części trajektorii była wystarczająca? Czy można wskazać klasy zakłóceń, dla których konieczne byłoby ponowne rozwiązanie problemu w szerszym zakresie?
3. Jak Autorka ocenia skalowalność opracowanego rozwiązania wraz ze wzrostem liczby zadań, liczby jednostek UAV oraz liczby ograniczeń wpływających na zbiór decyzji dopuszczalnych? Który element procesu generowania trajektorii może, zdaniem Autorki, stanowić główne ograniczenie obliczeniowe dla dużych instancji problemu?
4. W jakim zakresie opracowane modele i algorytmy mogą zostać przeniesione na inne problemy harmonogramowania i alokacji zasobów? Które elementy zaproponowanego rozwiązania są specyficzne dla środowiska UAV, a które można uznać za ogólne elementy technologii ALMM możliwe do wykorzystania w innych klasach problemów decyzyjnych?

Przedstawione pytania mają charakter naukowy i dyskusyjny i nie wynikają z dostrzeżonych błędów rozprawy. Dotyczą przede wszystkim granic stosowalności opracowanego rozwiązania, jego skalowalności, zakresu rekonfiguracji oraz możliwości generalizacji i dalszego rozwoju technologii ALMM.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Ewy Żesławskiej stanowi oryginalne i wartościowe opracowanie naukowe z zakresu informatyki technicznej i telekomunikacji. Za najważniejsze osiągnięcie rozprawy uznaję opracowanie spójnej koncepcji formalnego i adaptacyjnego harmonogramowania zadań floty UAV opartej na technologii ALMM. Jej zasadniczym elementem jest kaskada modeli ALMM, ALMM-TS, ALMM-CS, ALMM-TW oraz ALMM-D, umożliwiająca sukcesywne uwzględnianie kolejnych klas ograniczeń przy zachowaniu wspólnego rdzenia formalnego. Szczególnie istotne znaczenie ma powiązanie tej konstrukcji z algorytmiczną realizacją procesu harmonogramowania oraz mechanizmem rekonfiguracji jego przyszłego przebiegu w odpowiedzi na zakłócenia operacyjne.

Wartość naukowa rozprawy wynika nie tylko z zastosowania technologii ALMM do problemu harmonogramowania zadań UAV, lecz przede wszystkim z konsekwentnego przeprowadzenia pełnego ciągu badawczego: od formalizacji problemu, poprzez konstrukcję i sukcesywne rozszerzanie modeli, ich implementację algorytmiczną, aż do eksperymentalnej weryfikacji opracowanego rozwiązania. Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość generowania dopuszczalnych harmonogramów w warunkach analizowanych ograniczeń oraz adaptacji procesu decyzyjnego do wybranych zmian zachodzących w środowisku operacyjnym.

Na podkreślenie zasługuje również rozszerzalny i modularny charakter zaproponowanej kaskady. Zachowanie wspólnego rdzenia formalnego przy wyodrębnieniu mechanizmów odpowiadających kolejnym klasom ograniczeń stwarza podstawy do dalszego rozwoju technologii ALMM w kierunku komponentowej i obiektowej implementacji oraz budowy biblioteki modeli i mechanizmów przeznaczonych do rozwiązywania szerszej klasy problemów decyzyjnych. Właściwość tę traktuję jako istotny potencjał rozwojowy przedstawionej koncepcji.

Przeprowadzona analiza rozprawy pozwala stwierdzić, że sformułowany cel pracy został osiągnięty, a postawiona teza badawcza została potwierdzona. Opracowana kaskada modeli ALMM, jej algorytmiczna implementacja oraz wyniki przeprowadzonych badań eksperymentalnych wykazały możliwość wykorzystania technologii ALMM jako podstawy formalnego modelowania i adaptacyjnego harmonogramowania zadań operacyjnych floty UAV w warunkach dynamicznych ograniczeń operacyjnych.

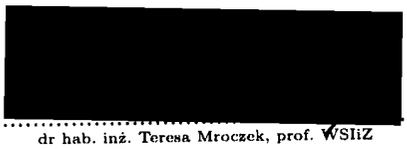
Autorka wykazała umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, właściwego posługiwania się aparatem formalnym, projektowania algorytmów oraz prowadzenia i interpretacji badań eksperymentalnych. Wskazane w recenzji uwagi mają charakter dyskusyjny i dotyczą przede wszystkim możliwości dalszego rozwoju, generalizacji oraz rozszerzenia zakresu walidacji zaproponowanego rozwiązania. Nie wpływają one na jednoznacznie pozytywną ocenę wartości naukowej rozprawy.

W mojej ocenie rozprawa doktorska mgr inż. Ewy Żesławskiej spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r, Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z późn. zm.) stawiane rozprawom doktorskim.

W związku z powyższym przedłożoną rozprawę doktorską oceniam **pozytywnie** i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Ewy Żesławskiej do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

Jednocześnie, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny rozprawy, oryginalność opracowanej kaskady modeli ALMM, spójne powiązanie warstwy formalnej, algorytmicznej i eksper-

mentalnej oraz potencjał dalszego rozwoju zaproponowanej koncepcji, zwracam się z wnioskiem o **wyróżnienie rozprawy doktorskiej**.



dr hab. inż. Teresa Mroczek, prof. WSIiZ