

dr hab. inż. Marek Karkula, prof. AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica
Wydział Zarządzania
Katedra Informatyki Biznesowej i Inżynierii Zarządzania
ul. Gramatyka 10, 30-067 Kraków
☎ (+48)12 617 43 30
✉ mkarkula@agh.edu.pl

Kraków, 10.02.2026

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra Arkadiusza Żurka, pt.:

METODA OCENY ODPORNOŚCI SYSTEMU AUTOMATYCZNEJ IDENTYFIKACJI DANYCH Z WYKORZYSTANIEM DRONÓW

Promotorka rozprawy doktorskiej: dr hab. inż. Agnieszka Tubis, prof. uczelni

1. Podstawy opracowania recenzji i kryteria oceny rozprawy

Podstawa prawna opracowania recenzji

- Ustawa z dnia 20.07.2018 r. – “Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2023, poz. 742 z późn. zm.);
- Rozporządzenia Ministra Edukacji i Nauki z dnia 11.10.2022 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz.U. 2022 poz. 2202).

Podstawa formalna opracowania recenzji

- zawiadomienie nr 36/10/D07/2025 o wyznaczeniu na Recenzenta w postępowaniu w sprawie nadania stopnia doktora
- uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej nr 221/12/RDND07/2024-2028 z dnia 7 października 2025;
- pismo Pana prof. dr hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej nr W10/RDND07/174/2025 z dnia 8 października 2025 roku;
- egzemplarz rozprawy doktorskiej mgra Arkadiusza Żurka.

Zakres recenzji i kryteria oceny rozprawy

Zakres recenzji i kryteria oceny rozprawy obejmują w szczególności: dobór i aktualność tematyki, poprawność sformułowania celu oraz pytań badawczych, poziom przeglądu literatury i spójność aparatu pojęciowego, oryginalność proponowanego rozwiązania metodycznego, rzetelność walidacji empirycznej oraz wartość wdrożeniową wyników, a także stronę formalną i językową pracy wraz z oceną materiału bibliograficznego.

2. Ogólna charakterystyka recenzowanej rozprawy doktorskiej

2.1. Dane formalne i przedmiot recenzji

Recenzowana praca została zrealizowana w Politechnice Wrocławskiej na Wydziale Mechanicznym w Katedrze Eksploatacji Systemów Technicznych. Promotorką pracy jest Pani dr hab. inż. Agnieszka Tubis, prof. uczelni.

Autor rozprawy, Pan mgr inż. Arkadiusz Żurek, jest absolwentem Szkoły Doktorskiej Politechniki Wrocławskiej w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, a dysertację przygotował w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” we współpracy z firmą NeuroSpace Sp. z o.o. Obszar działalności zawodowej Kandydata – obejmujący systemy autonomiczne UAV, Przemysł 4.0 oraz ocenę ryzyka eksploatacji dronów – jest ściśle związany z problematyką poruszaną w rozprawie. Szczególnie istotne dla prowadzonych badań jest kilkunastoletnie doświadczenie zawodowe Doktoranta w sektorze logistyki, w tym pełnienie funkcji kierowniczych w przedsiębiorstwach zajmujących się wdrażaniem systemów dronowych w operacjach magazynowych.

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska liczy 168 stron (w tym 150 stron tekstu zasadniczego), zawiera 14 tabel oraz 42 rysunki. Praca podejmuje aktualny i interdyscyplinarny problem opracowania oraz empirycznej weryfikacji metody oceny odporności systemu łączącego bezzałogowy statek powietrzny (UAV) i technologie automatycznej identyfikacji (AutoID) w zastosowaniach magazynowych.

2.2. Charakterystyka i układ rozprawy

Dysertacja ma przejrzystą i logicznie uporządkowaną strukturę obejmującą trzy części: teoretyczną, koncepcyjną i aplikacyjną. Całość opracowania zawiera wstęp, siedem rozdziałów merytorycznych zgrupowanych w trzech częściach tematycznych, podsumowanie oraz wykaz źródeł literaturowych i spisy tabel i rysunków. Taki układ należy ocenić jako klarowny i zrównoważony, odpowiadający wymogom prac naukowych o charakterze metodyczno-aplikacyjnym.

Część teoretyczna (rozdziały 1–4) stanowi bazę pojęciową dla dalszych rozważań. Autor rozpoczyna od charakterystyki systemów UAV, następnie osadza je w kontekście Logistyki 4.0, by w trzecim rozdziale przedstawić kluczowe trendy rozwojowe branży. Istotny dla rozprawy jest rozdział czwarty, poświęcony odporności systemów automatycznej identyfikacji z wykorzystaniem dronów. Rozdział piąty stanowi zwieńczenie części przeglądowej – na podstawie przeprowadzonej analizy literatury Autor zidentyfikował lukę badawczą oraz sformułował cele i zakres pracy.

Część koncepcyjna (rozdział 6) zawiera autorską propozycję metody M-UAV. Wyodrębnienie tej części jako samodzielnego elementu struktury podkreśla oryginalny wkład Autora i pozwala na identyfikację nowatorskich elementów rozprawy.

Część aplikacyjna (rozdział 7) prezentuje walidację opracowanej metody w oparciu o eksperymenty przeprowadzone w rzeczywistych systemach magazynowych. Empiryczna weryfikacja proponowanego rozwiązania jest szczególnie cenna w kontekście doktoratu wdrożeniowego. Podsumowanie zawiera syntetyczne ujęcie najważniejszych osiągnięć, ocenę praktycznej przydatności metody oraz wskazanie dalszych kierunków rozwoju.

2.3. Ocena doboru tematyki i zakresu rozprawy

Tematyka podjęta przez Kandydata wpisuje się w kluczowe nurty rozwojowe współczesnej inżynierii – Przemysłu 4.0 oraz Logistyki 4.0. Zastosowanie bezzałogowych statków powietrznych (UAV – *Unmanned Aerial Vehicles*) w procesach magazynowych, w szczególności do

automatyzacji procesów inwentaryzacji, stanowi dynamicznie rozwijający się obszar zarówno badań, jak i wdrożeń. Dobór tematyki rozprawy jest zatem trafny i aktualny.

Praca podejmuje zagadnienie o istotnej randze naukowej i aplikacyjnej – automatyzację procesów inwentaryzacji magazynowej z wykorzystaniem systemu UAV–AutoID – oraz koncentruje się na kluczowym, wciąż niewystarczająco opisanym metodycznie aspekcie wdrożeń: odporności i powtarzalności działania systemu w warunkach rzeczywistego środowiska magazynowego. Doktorant słusznie przyjął ujęcie systemowe, w którym system UAV–AutoID nie jest redukowany do pojedynczego komponentu, lecz analizowany jako układ techniczno-procesowy zintegrowany z otoczeniem operacyjnym. Obejmuje to m.in. ograniczoną dostępność sygnałów nawigacji satelitarnej w obiektach zamkniętych, obecność przeszkód infrastrukturalnych, zmienność warunków oświetleniowych i łączności oraz wymagania bezpieczeństwa pracy. Takie podejście koresponduje z obserwacjami branżowymi, zgodnie z którymi istotna część projektów automatyzacji magazynów nie osiąga zakładanych efektów nie z powodu braku technologii, lecz wskutek niedoszacowania złożoności wdrożenia i niewystarczająco przygotowanej ścieżki uruchomienia procesów. W konsekwencji uzasadniona jest potrzeba opracowania formalnej metody oceny odporności już na etapie projektowania i walidacji rozwiązania.

Tematykę rozprawy warto również osadzić w szerszym kontekście rynkowym. Według raportu Research and Markets ze stycznia 2026 r. wartość globalnego rynku systemów dronów magazynowych osiągnęła 4,04 mld USD w 2025 r., z prognozą wzrostu do 7,2 mld USD do 2030 r. przy średnim rocznym tempie 12,2%. Dynamika ta podnosi wymagania wobec jakości i uniwersalności stosowanych metod, tak aby zachowały użyteczność w warunkach szybko zmieniających się technologii i standardów operacyjnych.

Zasadność wyboru tematu potwierdzają również wyniki aktualnych badań publikowanych w prestiżowych czasopismach naukowych, wskazujące na rosnącą dojrzałość koncepcji inwentaryzacji z wykorzystaniem dronów – w tym integracji platform UAV z systemami AutoID i rozwiązaniami wizyjnymi. Badacze akcentują zarazem specyficzne ograniczenia środowiska magazynowego, w szczególności brak nawigacji satelitarnej, oraz potrzebę uwzględniania kompromisów pomiędzy efektywnością, ryzykiem a bezpieczeństwem dla takich rozwiązań.

Wobec powyższego stwierdzam, że problem badawczy postawiony przez Pana mgra inż. Arkadiusza Żurka ma charakter dysertabilny i odpowiada aktualnym potrzebom zarówno nauki, jak i praktyki gospodarczej w obszarze automatyzacji procesów logistycznych. Zapropozowane ujęcie, akcentujące metodyczną ocenę odporności systemu UAV–AutoID w warunkach rzeczywistych, stanowi wartościowy wkład w rozwój metod weryfikacji i walidacji rozwiązań cyberfizycznych dla logistyki wewnątrzzakładowej.

3. Ocena celów, pytań badawczych i tezy rozprawy

W rozdziale 5 dysertacji Autor przedstawił pogłębioną dyskusję dotyczącą zidentyfikowanej luki badawczej, na podstawie której sformułował cel główny i użyteczny pracy, a także wynikające z nich cele szczegółowe. W tej części rozprawy Kandydat postawił również pytania badawcze stanowiące punkt wyjścia do dalszych rozważań metodycznych i empirycznych.

3.1. Ocena identyfikacji luki badawczej

Identyfikację luki badawczej oceniam jako trafną. Doktorant wskazuje brak kompleksowej metody oceny odporności systemu UAV–AutoID, która ujmowałaby system w podejściu systemowym (aspekty inżynierskie, procesowe i wpływ otoczenia) oraz uwzględniała specyfikę zamkniętych obiektów magazynowych.

3.2. Ocena sformułowanego celu głównego i celów szczegółowych

Cel główny rozprawy Doktorant sformułował jako:

Opracowanie metody oceny odporności systemu UAV-AutoID w oparciu o podejście systemowe (obejmujące aspekty procesowe i inżynierskie), uwzględniającej zmienne warunki eksploatacyjne w trakcie realizacji misji.

Tak postawiony cel jest poprawny metodologicznie, istotny poznawczo oraz adekwatny do zdiagnozowanej luki badawczej. Trafne jest również zdefiniowanie celu użytecznego, co w kontekście doktoratu wdrożeniowego ma szczególne znaczenie. Cel ten ukierunkowany jest na zwiększenie efektywności i bezpieczeństwa procesów inwentaryzacji magazynowej – zarówno przez redukcję ryzyka zdarzeń niepożądanych i poprawę niezawodności oraz dostępności systemu, jak i przez optymalizację kosztów i czasu inwentaryzacji.

Powyższą strukturę dopełniają cele szczegółowe obejmujące m.in. identyfikację elementów systemu krytycznych dla odporności technicznej i procesowej, rozpoznanie warunków eksploatacyjnych oraz ich wpływu na powstawanie zakłóceń, konstrukcję kryteriów i wskaźników oceny odporności, określenie obszarów oceny ryzyka zdarzeń niepożądanych, a także integrację podejścia inżynierskiego z procesowym i walidację metody w warunkach rzeczywistych. Cele te tworzą spójny łańcuch logiczny – od konceptualizacji, przez operacjonalizację, do empirycznej weryfikacji.

Struktura celów rozprawy jest zatem wewnętrznie spójna i w mojej opinii zapewnia wystarczającą podstawę do realizacji programu badawczego.

3.3. Ocena poprawności i zasadności pytań badawczych

W rozdziale 5 Doktorant sformułował także cztery pytania badawcze (RQ1–RQ4) dotyczące kolejno: identyfikacji czynników odporności systemów UAV-AutoID (RQ1), klasyfikacji zakłóceń i ich konsekwencji dla stabilności systemu (RQ2), konstrukcji systemu pomiaru odporności (RQ3) oraz zastosowania metody w praktyce inwentaryzacyjnej (RQ4). Pytania te są logicznie uporządkowane, a ich sekwencja odpowiada naturalnemu cyklowi badawczemu – od identyfikacji determinant problemu, przez budowę aparatu pomiarowego, po jego aplikację. Szczególnej uwagi wymaga pytanie RQ3 dotyczące konstrukcji systemu pomiaru odporności – porównywalność ocen między obiektami zależy bowiem od precyzyjnego określenia zasad konstrukcji mierników. Odpowiedź na to pytanie wymaga także określenia reguł kalibracji wartości referencyjnych, procedur walidacji zależności między warunkami eksploatacyjnymi a wskaźnikami oraz analizy wrażliwości metody na przyjęte wartości progowe – aspektów, które w rozprawie nie zostały moim zdaniem dostatecznie wyjaśnione.

Pozytywnie należy ocenić zaproponowany w tabeli 5.1 schemat procesu badawczego – jego struktura jest przejrzysta, a poszczególne etapy generują rezultaty stanowiące dane wejściowe dla kolejnych kroków, co nadaje całości charakter iteracyjny i spójny z metodyką badań w obszarze inżynierii odporności i bezpieczeństwa systemów. Pytania badawcze znajdują operacjonalizację w strukturze proponowanej metody, w tym w modelu „domu odporności” opartym na filarach absorpcji, adaptacji, odtworzenia i bezpieczeństwa (rozdział 6). Po lekturze pracy można stwierdzić, że rozprawa odpowiada na postawione pytania w sposób spójny z profilem pracy wdrożeniowej – wychodząc od zidentyfikowanego problemu i dochodząc do konkretnego narzędzia oceny.

4. Ocena części teoretycznej rozprawy i przeglądu literatury

4.1. Ocena części teoretycznej pracy

Część teoretyczna rozprawy (rozdziały 1–4) stanowi fundament pojęciowy dla metody M-UAV. Jej układ jest klasyczny i poprawny – Autor prowadzi wywód od tła technologicznego UAV, przez Logistykę 4.0 i operacje magazynowe, po ramy odporności (*resilience*) jako kategorii interpretacyjnej dla systemów cyber-fizycznych. Tok rozumowania spójnie uzasadnia, dlaczego w przypadku systemów UAV-AutoID nie wystarcza klasyczna niezawodność komponentowa, lecz konieczna jest ocena odporności systemu jako całości – obejmująca utrzymanie funkcji identyfikacyjnej oraz zdolność adaptacji i odtwarzania procesu w warunkach zakłóceń. Przegląd literatury w rozdziałach 1–3 jest szeroki, ma jednak głównie charakter opisowo-porządkujący. W obecnej formie brakuje wyraźnego przełożenia wniosków z przeglądu na wymagania metodyczne – wskazane byłoby powiązanie klas zakłóceń zidentyfikowanych w literaturze z konkretnymi wskaźnikami odporności przyjętymi w metodzie M-UAV.

Przechodząc do oceny poszczególnych rozdziałów – rozdział 1, choć merytorycznie użyteczny, wykracza miejscami poza główny nurt rozprawy. Korzystne byłoby wyraźniejsze wyselekcjonowanie fragmentów bezpośrednio istotnych dla odporności w środowisku zamkniętym (w szczególności magazynowym), takich jak ograniczenia lokalizacji w warunkach niedostępności nawigacji satelitarnej (środowisko typu GNSS-denied), wpływ oświetlenia i geometrii regałów na jakość odczytu danych przez układy AutoID czy stabilność łączności w obiektach o złożonej strukturze i konstrukcji metalowej. Rozdział 2 oceniam jako najtrafniejszy z punktu widzenia celów rozprawy, ponieważ ujmuje techniki AutoID nie jako funkcję pojedynczego czujnika, lecz jako łańcuch danych od pozyskania po zapis w systemach klasy WMS/ERP. Ujęcie to warto byłoby jednak wzmocnić referencyjnym schematem architektury danych ze wskazaniem punktów krytycznych generujących błędy systemowe. Rozdział 3, poświęcony trendom w branży UAV na lata 2025–2030, pełni w obecnym ujęciu głównie funkcję kontekstową. Należałoby moim zdaniem uzupełnić go o krytyczną syntezę wskazującą, jakie nowe klasy zakłóceń wynikają z opisywanych trendów i w jaki sposób powinny być uwzględnione w ocenie odporności systemu. W rozdziale 4 Autor właściwie wprowadza odporność jako kategorię nadrzędną wobec niezawodności i bezpieczeństwa, poprawnie sygnalizując rozróżnienie odporności strukturalnej i funkcjonalnej. Rozdział wymaga jednak doprecyzowania w trzech obszarach: formalnego rozgraniczenia pojęć odporności (*resilience*), niezawodności (*reliability*), bezpieczeństwa (*safety*) i robustności (*robustness*) wraz ze wskazaniem, jakie odrębne grupy wskaźników odpowiadają każdemu z tych pojęć, tak aby możliwe było jednoznaczne przypisanie mierników stosowanych w metodzie M-UAV do właściwej kategorii; systematycznej klasyfikacji zakłóceń powiązanej z ich obserwowalnymi symptomami w danych z misji; oraz wyraźnego powiązania przyjętych kategorii odporności (absorpcja, adaptacja, odtworzenie, bezpieczeństwo) z mierzalnymi wskaźnikami efektywności procesu magazynowego i funkcji AutoID. Doprecyzowania te nie zmieniłyby meritum rozdziału, natomiast powinny wzmocnić jego naukowy charakter i ułatwić przełożenie ram teoretycznych na konstrukcję metody.

Reasumując ten fragment opinii – część teoretyczna rozprawy tworzy solidną bazę pojęciową i trafnie osadza problematykę odporności w kontekście systemów cyber-fizycznych. Jej wartość wzrosłaby jednak przy pogłębieniu krytycznej syntezy literatury oraz precyzyjniejszym określeniu granic analizowanego systemu UAV-AutoID.

4.2. Ocena wykorzystanej literatury i bibliografii załącznikowej

Wykaz bibliograficzny rozprawy obejmuje 240 pozycji, w całości anglojęzycznych. Aktualność źródeł oceniam pozytywnie – około 40% pozycji pochodzi z lat 2023–2025, co świadczy

o prowadzeniu kwerendy literaturowej praktycznie do momentu zamknięcia dysertacji. Kolejne 25–30% stanowią publikacje z lat 2020–2022, a pozostałe źródła obejmują literaturę dokumentującą ewolucję technologii UAV (lata 2010–2019) oraz prace kanoniczne z zakresu inżynierii bezpieczeństwa i teorii systemów (Hollnagel i inni [89], Sheffi [179], Woods [221]). Taka struktura – łącząca aktualne piśmiennictwo z renomowanych czasopism (m.in. IEEE Access, Reliability Engineering & System Safety, Drones, Sensors) ze źródłami fundamentalnymi – jest według mnie rozwiązaniem właściwym.

Wyłącznie anglojęzyczny charakter bibliografii jest uzasadniony międzynarodowym profilem badań nad systemami bezzałogowymi i inżynierią odporności. Wiąże się jednak z całkowitym pominięciem polskich źródeł normatywnych i prawnych – w wykazie brakuje odwołań do krajowych aktów prawnych regulujących operacje lotnicze, polskich norm czy standardów branżowych dotyczących operacji magazynowych. W kontekście rozprawy o profilu wdrożeniowym brak ten stanowi mankament wymagający uzasadnienia ze strony Autora.

Doktorant jest współautorem siedmiu publikacji z lat 2021–2025 wykazanych w bibliografii, dotyczących oceny ryzyka, zdarzeń niepożądanych oraz zastosowań UAV w operacjach magazynowych, co potwierdza konsekwentne budowanie kompetencji badawczych w obszarze rozprawy.

Od strony formalnej wykaz wymaga korekty redakcyjnej. Stwierdzono duplikat – pozycje [228] i [229], niekompletne metadane w kilku rekordach (m.in. pozycje [23], [154], [233]) oraz niespójność w zapisie tytułów. Uchybienia te mają charakter edytorski i nie podważają wartości merytorycznej doboru źródeł. Reasumując – bibliografia stanowi aktualną i adekwatną bazę źródłową dla rozprawy, w mojej opinii wymagałaby jednak uzupełnienia o polskie źródła normatywno-prawne oraz korekty redakcyjnej.

5. Ocena oryginalności rozwiązania naukowego

Najważniejszym oryginalnym elementem rozprawy jest autorska metoda M-UAV – pięcioetapowa procedura oceny odporności systemu UAV-AutoID. Wskaźniki odporności wyznaczone są w trybie *ex post*, tj. na podstawie danych z rzeczywistości zrealizowanych misji. Przyjęcie perspektywy *ex post* jest decyzją metodologicznie uzasadnioną – pozwala uchwycić faktyczne reakcje systemu na zakłócenia zamiast opierać się na modelowaniu teoretycznym czy eksperymentach laboratoryjnych. Autor przypisuje wynikom oceny trzy uzupełniające się funkcje: diagnostyczną, rozwojową i prognostyczną, co nadaje metodzie wymiar wykraczający poza jednorazową ewaluację.

Konstrukcję metody oparto na modelu „domu odporności” z czterema filarami – absorpcji, adaptacji, odtworzenia i bezpieczeństwa – odpowiadającymi fazom reakcji systemu na zakłócenie. Każdemu filarowi przyporządkowano zestaw wskaźników z jednoznacznie zdefiniowanymi formułami obliczeniowymi (tab. 6.2), co stanowi mocną stronę metody. Wartości bieżące wskaźników są odnoszone do macierzy referencyjnej z czterema poziomami odporności (od podstawowego po pożądany), a ocenę uzupełnia analiza ryzyka *ex post* oparta na wskaźniku RPN i zmiennych lingwistycznych. Taka architektura tworzy spójną ścieżkę od rejestracji danych misji, przez kwalifikację poziomu odporności, do formułowania priorytetyzowanych rekomendacji doskonalących.

Nowatorskość metody przejawia się na kilku poziomach. Po pierwsze – Autor identyfikuje ograniczenia dominujących w literaturze podejść fragmentarycznych i przeciwstawia im rozwiązanie integrujące analizę niezawodności komponentów UAV z modelami ryzyka operacyjnego w spójną procedurę. Po drugie – metoda jest konsekwentnie osadzona w dwuwymiarowej

przeźreni analitycznej łączącej charakterystykę systemu UAV-AutoID z charakterystyką środowiska eksploatacyjnego, co pozwala wykazać, że ta sama konfiguracja systemu może osiągać różny poziom odporności w różnych magazynach. Po trzecie – istotnym krokiem jest wprowadzenie formalnej definicji skutecznie zrealizowanej misji inwentaryzacyjnej obejmującej kompletność i jednoznaczność odczytów, wypełnienie rekordów bazy danych, realizację procedury operacyjnej oraz wykonanie w założonym czasie i koszcie. Pozwala to odróżnić poprawny lot od poprawnie zrealizowanej funkcji identyfikacyjnej systemu, co ma zasadnicze znaczenie dla prawidłowej interpretacji wskaźników odporności.

Z perspektywy dyscypliny naukowej – inżynierii mechanicznej – wkład metody polega na rozszerzeniu klasycznej niezawodności komponentów systemu na odporność funkcjonalną układu w interakcji z otoczeniem. Autor w przedstawionej metodzie integruje parametry typowe dla inżynierii niezawodności i utrzymania ruchu (MTBF/MTTR, dostępność, parametry energetyczne) z miernikami skuteczności funkcji podsystemu AutoID, co jest spójne z nowoczesnym nurtem oceny systemów mechatronicznych pracujących w warunkach niepewności. Rozbudowana baza wiedzy pomiarowej (tab. 6.1) obejmująca parametry techniczne, środowiskowe, komunikacyjne, energetyczne i pozycjonujące stanowi wartościowy element operacjonalizacji metody.

Analiza rozdziału 6 ujawnia jednak obszary wymagające doprecyzowania. Najpoważniejsze zastrzeżenie dotyczy statusu macierzy referencyjnej – Autor sam wskazuje (str. 115), że wartości referencyjne (WR) powinny być ustalane przez decydentów i że przedstawiony schemat ma charakter jedynie poglądowy. W rozprawie naukowej takie sformułowanie budzi wątpliwości, ponieważ brak formalnej procedury wyznaczania i aktualizacji WR osłabia powtarzalność i porównywalność ocen. Niezbędne jest określenie, czy wartości te mają charakter uniwersalny, branżowy, czy specyficzny dla danego systemu, a także wskazanie reguł ich kalibracji i warunków modyfikacji. Podobne zastrzeżenie dotyczy zbioru wskaźników, który Autor określa jako otwarty i modyfikowalny przez decydentów (str. 114) – choć elastyczność ta jest praktycznie uzasadniona, wymaga określenia zasad doboru minimalnego zestawu wskaźników gwarantującego porównywalność ocen.

Kolejnym obszarem wymagającym wzmocnienia jest kwestia normalizacji wskaźników wyrażonych w niejednorodnych jednostkach i skalach – część wskaźników ma charakter procentowy (mp. W_{PK} – wskaźnik pokrycia skanowania, W_{WM} – wskaźnik wykonania misji, W_D – wskaźnik dostępności), a część czasowy (T_{RZ} – czas reakcji na zakłócenie, T_{TR} – czas naprawy, T_{ODI} – czas odzyskiwania danych inwentaryzacyjnych). W rozprawie brakuje opisu procedury umożliwiającej ich wspólną interpretację lub ewentualną agregację do syntetycznego indeksu odporności. Brakuje również walidacji statystycznej zależności między klasami warunków eksploatacyjnych a uzyskiwanymi wartościami wskaźników.

Potencjał uniwersalności metody oceniam jako wysoki na poziomie architektury postępowania – pięcioetapowa struktura łącząca podejście *ex post* z bazą wiedzy misji i kwalifikacją odporności może być adaptowana do innych systemów cyber-fizycznych. Pełna generalizacja wyników liczbowych i wdrożenia wymaga jednak formalnego rozdzielenia tego, co w metodzie stanowi uniwersalną procedurę, od tego, co jest parametryzacją domenową – w szczególności doboru wskaźników, konstrukcji wartości referencyjnych WR i progów poziomów.

6. Ocena implementacji i walidacji metody oraz zastosowania wyników badań

Walidację metody M-UAV przeprowadzono w trzech odmiennych środowiskach magazynowych, co oceniam jako podejście właściwe – pozwala testować zarówno odporność systemu, jak i czułość metody na zróżnicowanie warunków eksploatacyjnych. Przypadki walidacyjne różnią się skalą obiektu, sposobem składowania i dominującymi źródłami zakłóceń, zachowując wspólny rdzeń: realizację misji AutoID w obiekcie zamkniętym przy równoczesnym prowadzeniu standardowych operacji logistycznych.

Pierwszy przypadek – centrum dystrybucyjne klasy A (ok. 8000 m², 52 misje) – dostarcza punktu odniesienia dla warunków nowoczesnego magazynu wysokiego składowania, w którym dominujące ograniczenia wynikają z interferencji środowiskowych i współdzielenia przestrzeni z procesami operacyjnymi. Drugi przypadek – magazyn składowania blokowego klasy B (ok. 4800 m², 40 misji) – rozszerza zakres walidacji o degradacje wynikające nie z platformy UAV, lecz z jakości warstwy informacyjnej i warunków lokalnych. Trzeci przypadek – magazyn przyprodukcyjny klasy A (ok. 1800 m², 60 misji, praca trzymianowa) – przesuwa ciężar interpretacji na uwarunkowania procesowe i organizacyjne, potwierdzając że odporność jest wynikiem interakcji systemu technicznego z organizacją pracy, a nie wyłącznie własnością samego systemu. Łącznie trzy przypadki zapewniają zróżnicowanie źródeł zakłóceń – od infrastrukturalnych, przez informacyjne, po organizacyjne.

Zaletą przyjętego podejścia jest wykorzystanie rzeczywistych danych misji, jawne obliczenia wskaźników oraz równoległa analiza ryzyka (RPN) tworząca spójną ścieżkę decyzyjną od pomiaru do rekomendacji. Uzyskane wartości wskaźników (m.in. W_PK w przedziale 91–92%, W_D powyżej 96%, zróżnicowane czasy reakcji i naprawy) pozwalają na porównanie przypadków i identyfikację wzorców degradacji odporności w zależności od klasy środowiska.

Należy jednak odnotować, że trzy przypadki walidacyjne – choć zróżnicowane pod względem warunków eksploatacyjnych – nie stanowią wystarczającej podstawy do formułowania tezy o uniwersalności metody. Wszystkie dotyczą magazynów, w których wykorzystano jedną platformę UAV-AutoID (system opracowany z firmą NeuroSpace Sp. z o.o.). Autor w tekście rozprawy wspomina o ponad 20 kampaniach testowych przeprowadzonych w trzech krajach (str. 96), jednak do formalnej walidacji wybrano jedynie trzy z nich bez uzasadnienia kryterium doboru. Walidacja przekonująco wykazuje stosowalność i wartość aplikacyjną metody w badanym ekosystemie, natomiast twierdzenia o jej uniwersalności wymagałyby szerszej weryfikacji – obejmującej inne platformy UAV-AutoID, odmienne sektory przemysłowe oraz niezależne zespoły badawcze.

Niezależnie od pozytywnej oceny walidacji, w rozprawie pozostają trzy obszary wymagające doprecyzowania, sygnalizowane częściowo we wcześniejszej ocenie oryginalności metody. Po pierwsze – w rozprawie brakuje formalnej procedury wyznaczania i aktualizacji wartości referencyjnych WR; bez niej trudno ocenić, na ile uzyskane kwalifikacje do poziomów odporności są powtarzalne i przenoszalne na inne obiekty. Po drugie – wskazana jest walidacja statystyczna obejmująca istotność zależności między klasami warunków eksploatacyjnych a wartościami wskaźników oraz analizę wrażliwości ocen na przyjęte wartości referencyjnych WR. Po trzecie – zasadne jest wyraźniejsze rozdzielenie w interpretacji wyników wpływu parametrów systemu (UAV-AutoID) od parametrów otoczenia (organizacja pracy, jakość etykiet, natężenie ruchu), co pozwoliłoby uniknąć nadinterpretacji przy porównywaniu obiektów. Uwagi te nie podważają wartości przeprowadzonej walidacji, lecz ich uwzględnienie wzmocniłoby kontrolność metody i jej potencjał porównawczy.

7. Ocena umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Doktorant wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej właściwą dla badań inżynierskich o profilu wdrożeniowym – potrafi zdefiniować problem, zaprojektować procedurę badawczą oraz przeprowadzić jej weryfikację w warunkach rzeczywistych. Dojrzałość metodologiczną potwierdza opracowanie metody M-UAV jako spójnej procedury łączącej rejestrację danych z misji z oceną odporności systemu i formułowaniem rekomendacji doskonalących.

Autor wykazuje również zdolność integracji obserwacji teoretycznych z praktyką przemysłową – walidacja metody w zróżnicowanych środowiskach magazynowych z równoległym uwzględnieniem wskaźników efektywności i analizy ryzyka stanowi tego wyraźne potwierdzenie. Interdyscyplinarność podejścia ma charakter funkcjonalny: łączy zagadnienia eksploatacji i niezawodności UAV, technologii AutoID, uwarunkowań środowiskowo-organizacyjnych magazynu oraz narzędzi oceny ryzyka, nie rozmywając przy tym głównego nurtu rozprawy.

Dorobek publikacyjny Doktoranta jest spójny z tematyką dysertacji i obejmuje co najmniej siedem pozycji wykazanych w bibliografii, dotyczących oceny ryzyka, zdarzeń niepożądanych oraz zastosowań UAV w operacjach magazynowych, co potwierdza konsekwentne budowanie programu badawczego prowadzącego do sformułowania i walidacji autorskiej metody.

8. Ocena strony formalnej rozprawy

Strona formalna rozprawy nie budzi większych zastrzeżeń. Jak wskazano wcześniej logika konstrukcji rozprawy jest zachowana – część teoretyczna wprowadza tło pojęciowe, część metodyczna porządkuje procedurę M-UAV, a część aplikacyjna prezentuje walidację na danych rzeczywistych. Chociaż język rozprawy jest poprawny – większość tekstu pracy została napisanych poprawnie i w tonie właściwym dla pracy naukowej – należy zasygnalizować, że występują miejsca wymagające korekty stylistycznej i redakcyjnej. Szczegółowe uwagi zostały zamieszczone w kolejnym rozdziale tej recenzji.

9. Pytania do Doktoranta i uwagi krytyczne

Poniżej przedstawiam pytania wynikające z uwag i wątpliwości formułowanych w kolejnych częściach recenzji, do których proszę Kandydata o przygotowanie odpowiedzi w trakcie obrony. W dalszej części zamieszczam również uwagi szczegółowe dotyczące strony redakcyjnej rozprawy, w tym numeracji, terminologii oraz materiału tabelarycznego i graficznego.

Spostrzeżenia ogólne i pytania do Doktoranta

1. W rozdziałach przeglądowych pojawia się miejscami styl wyliczeniowy oparty na streszczaniu pozycji literaturowych, bez autorskiego, syntetycznego podsumowania i bez przełożenia na wymagania metody M-UAV.
2. Należy odnotować brak syntetycznego schematu architektury systemu UAV-AutoID, który w ujęciu graficznym pokazywałby relacje między komponentami platformy, przepływy danych oraz punkty interakcji z otoczeniem magazynowym. Zamieszczenie takiego schematu wzmocniłoby czytelność opisu metody i ułatwiło identyfikację miejsc powstawania zakłóceń analizowanych w kolejnych etapach procedury M-UAV.
3. Schemat etapów metody M-UAV (rys. 6.1) pełni wartościową funkcję orientacyjną i poprawnie oddaje sekwencyjną logikę procedury. Szczegółowe przedstawienie bazy wiedzy pomiarowej w etapie 3 oraz powiązanie etapu 4 z czterema filarami odporności wzmacniają operacyjny charakter metody. Chciałbym jednak zgłosić następujące uwagi.

Po pierwsze – schemat sugeruje przebieg czysto sekwencyjny, podczas gdy Autor deklaruje iteracyjność metody i pętlę uczenia się systemu; brak pętli zwrotnej z etapu 5 do etapów wcześniejszych stanowi pewną niespójność z opisem słownym. Po drugie – pomiędzy etapem 3 (*Rejestracja parametrów wykonanych misji*) a etapem 4 (*Ocena odporności*) nie pokazano procedury odniesienia wartości bieżących do macierzy referencyjnej WR, będącej kluczowym elementem metody. Po trzecie – opis etapu 1 zawiera parametry konkretnej konfiguracji platformy, co odpowiada raczej opisowi przypadku walidacyjnego niż schematowi metody ogólnej. Dla zachowania spójności z deklarowaną uniwersalnością metody wskazane byłoby rozdzielenie schematu procedury od opisu konkretnej implementacji.

4. Jaką formalną procedurę Autor proponuje dla wyznaczania i aktualizacji wartości referencyjnych (WR), tak aby zapewnić porównywalność ocen między obiektami i w czasie? Czy przeprowadzono analizę wrażliwości ocen na zmianę przyjętych progów tych wartości?
5. Procesy magazynowe i warunki realizacji misji mają charakter stochastyczny – wartości parametrów systemu zmieniają się losowo między misjami i w ich trakcie. W jaki sposób Autor uwzględni tę zmienność w konstrukcji metody M-UAV? Czy rozważano zastosowanie narzędzi analizy statystycznej w celu odróżnienia rzeczywistych różnic w poziomie odporności od naturalnej zmienności pomiarowej?
6. Wskaźniki w metodzie M-UAV są wyrażone w niejednorodnych jednostkach (wartości procentowe i czasowe). Jakie metody normalizacji i ewentualnej agregacji Autor uznaje za uzasadnione, jeśli celem byłoby uzyskanie syntetycznego indeksu odporności umożliwiającego porównania między magazynami?
7. W rozprawie zidentyfikowano zakłócenia elektromagnetyczne i problemy z łącznością jako istotne źródła degradacji systemu. Czy zasadne byłoby włączenie do bazy wiedzy metryk jakości kanału komunikacyjnego jako formalnych predyktorów degradacji wskaźników odporności?

Uwagi szczegółowe

Poniżej wskazano uwagi o charakterze formalno-redakcyjnym, które nie podważają wartości merytorycznej rozprawy, lecz ich uwzględnienie przyczyniłoby się do podniesienia jakości rozprawy.

- 1) W rozprawie występuje znaczna liczba akronimów, jednak brakuje ich zestawionego wykazu. Jego zamieszczenie ułatwiłoby lekturę, zwłaszcza czytelnikom spoza wąskiej specjalności Autora.
- 2) W przedstawionym wykazie literatury występują następujące usterki: zidentyfikowano zdublowane pozycje ([228, 229] – Yun, Im & Han, 2025), kilka rekordów z niekompletnymi danymi bibliograficznymi (np. [23] – Barreiro et al., 2021; [154] – Petráček et al., 2023; [233] – Zhang et al., 2024) oraz zauważono niekonsekwencje w formatowaniu (brakujące numery DOI/URL, niespójne użycie skrótów) czy niepełne opisy źródeł internetowych np. wpisy arXiv bez identyfikatora dla pozycji [165].
- 3) Na str. 24 zauważono usterkę redakcyjną (zdublowany wyraz): *Kierunki Kierunki rozwoju...*
- 4) Na str. 49 w zdaniu pozostawiono wpis: *... w systemy sztucznej inteligencji (AI), które umożliwiają źródło* zamiast poprawnego odwołania na końcu tego zdania.

- 5) W podsumowaniu etapu 3 (str. 111) Autor powołuje się na wyniki badań prezentowanych na konferencjach, wskazując jedynie ich lokalizacje („na ESREL (Irlandia)”, „w Bojnicach”, „w Pradze”) bez pełnych odwołań bibliograficznych. Ponadto ten sam akapit otwiera zdanie *Podsumowanie w tabeli obejmuje komplet danych...*, jednak tabela 6.1 takiego podsumowania nie zawiera.
- 6) W tabeli 6.2 tytuł zapowiada „zbiór wskaźników i mierników”, jednak nagłówek kolumny zawiera wyłącznie „Nazwa wskaźnika”, a rozróżnienie między obiema kategoriami nie jest przeprowadzone w strukturze tabeli. Tymczasem pozycje czasowe (T_RBP, T_RZ, T_TR, T_ODI), wyrażające bezpośredni pomiar w jednostkach czasu, stanowią mierniki, nie wskaźniki w ścisłym rozumieniu.
- 7) Na str. 125 zauważono niedokończone zdanie: *Ten element systemu UAV został przedstawiony na rysunku...*
- 8) W kilku miejscach pracy zauważono sformułowania o charakterze potocznym lub publicystycznym, obniżające rygor stylu naukowego pracy.
- 9) W pracy zauważono usterki interpunkcyjne, stylistyczne, literowe i inne uchybienia edytorskie, nie mają one istotnego wpływu na jej ocenę merytoryczną.

10. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska podejmuje problem istotny naukowo i aplikacyjnie, odpowiadający na aktualne wyzwania automatyzacji logistyki wewnętrznej i eksploatacji systemów autonomicznych w zmiennych warunkach środowiska magazynowego. Aktualność i dysertabilność problemu oceniam jednoznacznie pozytywnie.

Jako najważniejsze osiągnięcia Kandydata w recenzowanej pracy uznaję:

- 1) Opracowanie autorskiej metody M-UAV jako procedury oceny odporności systemu UAV-AutoID, integrującej perspektywę inżynierską, procesową i środowiskową.
- 2) Operacjonalizację pojęcia odporności systemu UAV-AutoID w postaci aparatu pomiarowego obejmującego wskaźniki, macierz wartości referencyjnych i powiązaną z nimi analizę ryzyka.
- 3) Przeprowadzenie walidacji w trzech zróżnicowanych środowiskach magazynowych z przedstawieniem mierzalnych wskaźników i ich kwalifikacji do poziomów odporności.

Rozprawa posiada zatem nie tylko walor poznawczy, ale także wyraźną użyteczność praktyczną, zgodną z profilem doktoratu wdrożeniowego.

Uwagi krytyczne sformułowane w recenzji – dotyczące w szczególności doprecyzowania procedury kalibracji wartości referencyjnych, porównywalności i normalizacji wskaźników, walidacji statystycznej oraz korekty usterek formalnych – mają charakter zaleceń doskonalących i nie podważają istoty rozwiązania naukowego.

Na podstawie przeprowadzonej analizy, obejmującej ocenę aktualności podjętej problematyki, poprawności celów i pytań badawczych, spójności wywodu, zastosowanych narzędzi badawczych oraz wartości poznawczej i aplikacyjnej uzyskanych wyników, stwierdzam, że rozprawa **Pana mgra inż. Arkadiusza Żurka** pt.: *Metoda oceny odporności systemu automatycznej identyfikacji danych z wykorzystaniem dronów* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia badań i wiedzy teoretycznej Kandydata w zakresie objętym rozprawą. Praca spełnia tym samym wymagania określone

w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) i może stanowić podstawę do nadania stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie *inżynieria mechaniczna*.

Na podstawie powyższego uzasadnienia wnoszę o dopuszczenie recenzowanej rozprawy doktorskiej do publicznej obrony.

dr hab. inż. Marek Karkula, prof. AGH

