dr hab. inż. Krzysztof Kalinowski, prof. PŚ
Politechnika Śląska
Wydział Mechaniczny Technologiczny
Katedra Automatyzacji Procesów Technologicznych
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania
44-100 Gliwice, Konarskiego 18a

Gliwice, 30.04.2026

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosza Poskarta
pt. „Wieloparametryczny model zużycia energii autonomicznego robota mobilnego do predykcji wykonalności zadań transportowych”

Podstawa opracowania recenzji

Recenzja została opracowana na zlecenie Prorektorki ds. badań i innowacji Politechniki Wrocławskiej, prof. dr hab. inż. Renaty Krzyżyńskiej, w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna nr 353/17/RDND07/2024-2028 z dnia 17 lutego 2026 r. oraz w zw. z art. 190 ust. 2 i art. 183 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t. j. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571).

Promotor pracy: prof. dr hab. inż. Anna Burduk
Promotor pomocniczy: dr inż. Kamil Krot

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska podejmuje ważny i aktualny problem badawczy dotyczący predykcji zużycia energii przez autonomiczne roboty mobilne (AMR) w zastosowaniach intralogistycznych. Dynamiczny wzrost wdrożeń AMR w sektorze produkcyjnym, wynikający z potrzeb rozwijającego się przemysłu, korzystającego z technologii Przemysłu 4.0 i realizującego założenia Przemysłu 5.0, uwidacznia poważne ograniczenia współczesnych systemów zarządzania flotą (FMS). Decyzje operacyjne w tych systemach opierają się głównie na prostym, procentowym wskaźniku poziomu naładowania akumulatora (SoC) i statycznych progach, co uniemożliwia rzetelną ocenę wykonalności misji, prowadzi do nadmiarowego powiększania flot i utrudnia efektywne harmonogramowanie realizowanych procesów transportowych i procesów ładowania.

W związku z powyższym, opracowanie wiarygodnych modeli predykcyjnych zużycia energii dla komercyjnych platform AMR – o ograniczonej obserwowalności i bez dostępu do niskopoziomowych parametrów sterowania – stanowi istotną lukę badawczą i praktyczną.

Tematyka wpisuje się w aktualne kierunki badań z zakresu inteligentnych systemów transportu wewnętrznego, predykcyjnego zarządzania energią oraz zastosowań uczenia maszynowego w systemach cyber-fizycznych. Wybrany kierunek badań oceniam więc jako istotny i nowatorski zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia.

2. Struktura i kompozycja pracy

Rozprawa liczy 173 strony i składa się z siedmiu rozdziałów merytorycznych, poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim oraz wykazem akronimów. Bibliografia obejmuje 186 pozycji, w większości z ostatnich pięciu lat. Struktura pracy jest logiczna i klarowna: od wprowadzenia teoretycznego i przeglądu literatury, przez identyfikację zmiennych, projekt eksperymentów i budowę stanowiska pomiarowego, aż po opracowanie modeli predykcyjnych, ich walidację oraz syntezę wyników. Każdy rozdział rozpoczyna się syntetycznym streszczeniem ułatwiającym śledzenie toku rozumowania.

Rozdziały 1 i 2 stanowią solidny fundament teoretyczny: od kontekstu technologiczno-przemysłowego (systemy FMS, technologie zasilania AMR), przez systematyczny przegląd trzech klas metod predykcji zużycia energii (modele fizyczno-strukturalne, oparte na danych z wykorzystaniem ML oraz hybrydowe), aż po identyfikację luki badawczej. Przegląd jest kompleksowy i wyczerpujący. Rozdział 3 precyzyjnie definiuje cel główny, zadania szczegółowe i metodykę, a rozbudowana mapa rozdziałów (Rys. 24) wraz z tabelami zadań badawczych i utylitarnych (Tab. 10–11) świadczy o dojrzałym planie badawczym. Rozdziały 4–6 tworzą spójną, przemyślaną sekwencję etapów badawczych: od selekcji predyktorów i projektu eksperymentów, przez opis stanowiska pomiarowego, aż po trzy modele predykcyjne o rosnącym stopniu zaawansowania (M1: regresja wielomianowa, M2: GLM, M3: AutoML). Rozdział 7 zawiera precyzyjne podsumowanie wyników, weryfikację celów, opis ograniczeń i perspektywy dalszych badań.

3. Ocena metodyki i warsztatu badawczego

Warstwa metodyczna stanowi mocną stronę pracy. Doktorant prawidłowo identyfikuje lukę badawczą (Rozdz. 3.1): brak uniwersalnego, wieloparametrycznego modelu predykcji energii dla komercyjnych AMR, który łączyłby zmienne misji, środowiska i stanu robota, a jednocześnie mógłby być zintegrowany z systemem FMS do oceny wykonalności zadań. Sformułowany cel główny i cele szczegółowe są adekwatne i ambitne. W celu ich realizacji zaproponowany został spójny, wieloetapowy proces badawczy, którego etapy logicznie wynikają z siebie: od analizy literatury i klasyfikacji zmiennych wejściowych, przez planowanie eksperymentów i gromadzenie danych, aż po modelowanie i walidację. Szczególną uwagę zwraca zestawienie celów, etapów, metod i oczekiwanych wyników (Tab. 12), które świadczy o starannym i przemyślanym podejściu do planowania badań.

Na podkreślenie zasługuje również autorska, trójetapowa metoda identyfikacji i selekcji predyktorów (Rys. 26) zawierająca analizę literaturowo-fizyczną (bilans sił, mocy i sprawności), systematykę jakościową z diagramem Ishikawy, oraz ilościową ocenę ważności

cech metodami statystycznymi (LASSO, regresja krokowa) i wartościami Shapleya. Wynikiem jest dobrze uargumentowany, zredukowany zestaw zmiennych mierzalnych i dostępnych przez API robota. Podejście to jest w pełni uzasadnione w kontekście komercyjnych platform AMR o ograniczonej obserwowalności systemu.

Projekt eksperymentów został zrealizowany zgodnie z zasadami *Design of Experiments* (DoE). Dwuetapowy plan zawierający eksperyment wstępny, jednoczynnikowy (*One-Factor-at-a-Time*, OFAT) oraz eksperymenty wieloczynnikowe, z replikacjami, dwoma akumulatorami o różnym stopniu zużycia, trzema poziomami obciążenia (0, 50, 100 kg) i trzema dystansami (30, 140, 350 m) w szerokim zakresie SoC (100–10 %) można uznać za kompleksowy. Łączna liczba misji pomiarowych przekroczyła 7 000, co stanowi solidną podstawę statystyczną do modelowania. Dobór czujników i protokołów komunikacyjnych jest poprzedzony staranną analizą wielokryterialną, co świadczy o solidnym warsztacie inżynierskim Autora.

Zaprojektowanie autorskiego systemu akwizycji danych w środowisku Node-RED, zintegrowanego z interfejsem REST API robota, czujnikami IoT i infrastrukturą Wi-Fi, który pełni funkcję uproszczonego FMS, dowodzi wysokich kompetencji inżynierskich Doktoranta. Wielomodelowe podejście – model referencyjny, GLM i AutoML – umożliwia stopniowe zwiększanie dokładności i krytyczną ocenę kompromisu między interpretowalnością a skutecznością predykcji, co jest zgodne z zadeklarowanymi celami pracy.

4. Wyniki badań i jakość modeli predykcyjnych

Model M1 (AR-S ≈ 0,91) potwierdza dominującą rolę SoC jako predyktora i stanowi właściwy punkt odniesienia dla modeli wieloparametrycznych. Demonstruje również praktyczną użyteczność: cztery scenariusze testowe pokazują jego udane zastosowanie do detekcji anomalii energetycznych na trasie. Model M2 (GLM) osiągnął AR-S = 0,9508 (akumulator używany) i 0,9591 (akumulator nowy), przy zachowaniu pełnej interpretowalności. Jawna postać analityczna modelu (równanie 11), opisująca zużycie energii jako funkcję liczby zakrętów, dystansu, SoC i interakcji SoC×Distance, spełnia kryteria modelu „białej skrzynki" i może być bezpośrednio zaimplementowana w systemie FMS bez specjalistycznej infrastruktury obliczeniowej. Diagnostyka reszt (Rys. 51) i obserwacji wpływowych (Rys. 52) potwierdzają poprawność statystyczną modelu. Model M3 stosujący zautomatyzowane uczenie maszynowe (AutoML, przez platformę Vertex AI) osiągnął najwyższą dokładność: AR-S = 0,982, przy MAE rzędu 0,07 % SoC i RMSE < 0,12 % SoC. Wyniki te są zbliżone do najlepszych rezultatów raportowanych w literaturze dla podobnych systemów, a przy tym uzyskane dla komercyjnej platformy z ograniczoną obserwowalnością. Zbliżone wartości R^2 i AR-S wskazują, że model nie zawiera zbędnych predyktorów.

Wyniki analizy ważności predyktorów są spójne między podejściami (metoda Shapleya dla M3, sekwencyjny wzrost AR-S dla M2): trzy dominujące predyktory to liczba zakrętów, początkowy SoC i długość trasy. Jest to oryginalna, ilościowa weryfikacja ich względnego wpływu dla komercyjnego AMR w warunkach przemysłowych. Rzetelnym wynikiem jest

również stwierdzenie ograniczonego wpływu masy ładunku, uzasadnione wysokim udziałem systemów nawigacyjnych i sterowania w bilansie energetycznym. Potwierdzenie zbliżonej dokładności modelu dla akumulatora dwuletniego i nowego stanowi istotny wynik praktyczny, który sugeruje możliwość stosowania jednego modelu niezależnie od stopnia zużycia baterii w przedziale do ok. dwóch lat eksploatacji.

Uzyskane wyniki są przekonujące i w pełni realizują cel główny pracy.

5. Oryginalność i wkład naukowy

Wkład naukowy rozprawy jest wieloaspektowy i dobrze udokumentowany. Za oryginalne należy uznać w szczególności:

- opracowanie kompletnej, empirycznie zweryfikowanej metodyki predykcji zużycia energii dla komercyjnego AMR o ograniczonej obserwowalności systemu – w literaturze analogiczne prace dotyczą niemal wyłącznie robotów prototypowych;
- formalne, trójetapowe podejście do identyfikacji i selekcji predyktorów, możliwe do replikacji dla innych platform robotów komercyjnych;
- zbiór danych pomiarowych obejmujący ponad 7 000 misji przy systematycznym pokryciu przestrzeni czynników eksperymentalnych – imponujący w kontekście tego typu zbiorów opisywanych w literaturze dla komercyjnych AMR;
- ilościowe porównanie podejść white-box (GLM) i black-box (AutoML) dla predykcji energetycznej AMR, ze szczegółową analizą kompromisu między interpretowalnością a dokładnością;
- implementacja modeli w autorskim systemie w środowisku Node-RED do oceny wykonalności zakolejkowanych misji i wykrywania anomalii energetycznych.

Doktorant publikował wyniki badań cząstkowych w recenzowanych wydawnictwach oraz materiałach konferencyjnych, co stanowi niezależne potwierdzenie ich wartości naukowej.

6. Uwagi krytyczne i pytania do obrony

Praca napisana jest bardzo starannie, jednak podczas lektury nasuwają się pewne pytania. Poniższe uwagi mają charakter merytorycznej dyskusji i nie podważają wysokiej wartości naukowej rozprawy.

1. Ograniczenia wynikające z jednoplatformowości badań. Praca opiera się wyłącznie na danych z robota MiR100, a wnioski generalizują rezultaty do klasy komercyjnych AMR. Warto szerzej wyjaśnić, w jakim stopniu zaproponowana metodyka – nie zaś same modele – jest możliwa do przeniesienia na inne typy AMR (np. MiR200, KUKA KMP, OMRON MD). Jakich modyfikacji wymagałoby jej zastosowanie dla robota z inną architekturą układu napędowego lub odmiennym typem akumulatora?

2. Ujemny współczynnik przy zmiennej Turns w modelu M2. W zaprezentowanym wzorze (11.) współczynnik przy zmiennej Turns przyjmuje wartość ujemną, co wydaje się sprzeczne z intuicją fizyczną – dodatkowe manewry robota, tj. skręcanie i wymuszone przy tym zwalnianie, przyspieszanie, powinny wiązać się z wyższym wydatkiem energetycznym. Stoi to również w sprzeczności z wynikami analizy ważności Shapleya (gdzie Turns jest predyktorem nr 1 z najwyższą wartością dodatnią w M3) oraz ze stwierdzeniem Autora na str. 138, że „misje o dużej liczbie zakrętów prowadzą do istotnie większego zużycia energii". Czy ujemny znak wynika z korelacji z innymi predyktorami lub specyfiki profilu misji?

3. Zmienna Turns jest wyznaczana na podstawie danych z API MiR100, jednak nie podano szczegółów, np. progu kąta detekcji zakrętu ani tego, czy API MiR100 rozróżnia skręty planowane od manewrów ominięcia przeszkód. Jeśli każda korekta kursu jest liczona jako zakręt, predyktor staje się zmienną hybrydową łączącą geometrię trasy z dynamiką środowiska, co utrudnia interpretację fizyczną a w przyszłości replikację modelu na robocie z odmiennym algorytmem nawigacji. W jakim stopniu wpływa to na stabilność predyktora między sesjami pomiarowymi?

4. Ograniczenie walidacji do danych wewnętrznych. Modele M2 i M3 poddano walidacji wewnętrznej na danych z tego samego eksperymentu; nie przeprowadzono walidacji na niezależnym zbiorze misji realizowanych w odmiennych warunkach, np. o innej porze roku, innym stopniu komplikacji trajektorii na hali, innej nawierzchni. Jak Doktorant ocenia ryzyko dryfu jakości predykcji po wdrożeniu modeli w produkcyjnym środowisku intralogistycznym (scenariusz Out-of-Distribution)?

5. Czy model utworzony za pomocą narzędzia AutoML jest równie dokładny dla każdej grupy dystansowej? Np. Tabela 36 wskazuje wyraźną asymetrię liczebności misji: trasa 30 m generowała do 1 227 obserwacji na kombinację, trasa 350 m jedynie 77–135. Jest tu prawie 10-krotna dysproporcja. Autor uzasadnia to podobieństwem zbioru do rzeczywistych warunków eksploatacyjnych, ale czy mimo tej świadomej decyzji zasadna byłaby dodatkowa analiza błędów w poszczególnych grupach dystansowych, w celu sprawdzenia, czy niezbalansowanie nie wpływa negatywnie na predykcję misji długich?

7. Ocena i wniosek końcowy

Praca stanowi oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego i praktycznego. Doktorant wykazał się rozległą wiedzą teoretyczną z zakresu robotyki mobilnej, intralogistyki, technik modelowania i uczenia maszynowego, umiejętnością samodzielnego planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych, jak również dojrzałością w formułowaniu wniosków i krytycznej ocenie własnych wyników. Opracowana metodyka i uzyskane wyniki mogą stanowić bezpośrednią podstawę do wdrożeń w komercyjnych systemach zarządzania flotami AMR. Pracę oceniam pozytywnie.

Podsumowując stwierdzam, iż rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Poskarta pt. „Wieloparametryczny model zużycia energii autonomicznego robota mobilnego do predykcji wykonalności zadań transportowych" spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w rozumieniu art. 187 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2024r. poz. 1571). Wobec powyższego wnoszę do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Wrocławskiej o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

[redacted]