

Poznań, 28.04.2026 r.

dr hab. inż. Tomasz BARTKOWIAK, prof. PP
Kierownik Zakładu Maszyn Technologicznych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska

RECENZJA

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

1. Podstawa prawna

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartosza Poskarta pt. *„Wieloparametryczny model zużycia energii autonomicznego robota mobilnego do predykcji wykonalności zadań transportowych”* została przygotowana na podstawie korespondencji od Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna prof. dra hab. inż. Zbigniewa Gronostajskiego, tj. pisma nr W10/RDND07/27/2026 z 17 lutego 2026 r. oraz zawiadomienia nr 11/02/D07/2026 o wyznaczeniu mojej osoby na Recenzenta w przedmiotowym postępowaniu.

2. Ogólna charakterystyka pracy

Rozprawa doktorska mgra inż. Bartosza Poskarta dotyczy istotnego, aktualnego i interdyscyplinarnego zagadnienia z zakresu inżynierii, związanego w szczególności z intralogistyką oraz systemami autonomicznych robotów mobilnych (AMR). Tematyka pracy wpisuje się w nurt badań związanych z rozwojem koncepcji Przemysłu 4.0 oraz cyfryzacji procesów logistycznych, gdzie rośnie znaczenie efektywnego zarządzania energią i planowania zadań robotów.

Celem głównym pracy było opracowanie i weryfikacja modelu predykcyjnego zużycia energii dla komercyjnego robota mobilnego, umożliwiającego ocenę wykonalności misji

transportowych oraz wsparcie decyzji operacyjnych. Autor sformułował również cele szczegółowe obejmujące identyfikację czynników wpływających na zużycie energii, opracowanie metodyki pozyskiwania danych oraz budowę modeli predykcyjnych o różnym stopniu ich złożoności.

Rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny. Autor przeprowadził przegląd literatury dotyczącej metod predykcji zużycia energii w robotach mobilnych, obejmujący modele fizyczne, dane oparte na uczeniu maszynowym oraz podejścia hybrydowe. Na tej podstawie zidentyfikowano lukę badawczą, polegającą na braku modeli możliwych do zastosowania w rzeczywistych, komercyjnych systemach AMR przy ograniczonej dostępności danych.

W części badawczej zaprojektowano stanowisko pomiarowe umożliwiające rejestrację danych operacyjnych i energetycznych robota. Na podstawie zgromadzonych danych opracowano trzy modele predykcyjne (zgodnie z zapisem Autora rozprawy):

- model jednowymiarowy (M1),
- model statystyczny typu GLM (M2),
- model oparty na AutoML (M3).

Przeprowadzona walidacja wykazała przewagę modeli wieloparametrycznych nad podejściem jednowymiarowym, przy czym najwyższą dokładność osiągnął model, który powstał z użyciem narzędzia AutoML.

Struktura pracy jest logiczna i obejmuje siedem rozdziałów, prowadzących czytelnika od analizy stanu wiedzy, przez część metodologiczną i eksperymentalną, aż do syntezy wyników i wniosków końcowych.

3. Ocena pracy

3.1. Tematyka i jej aktualność

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Bartosza Poskarta jest aktualna i dobrze wpisuje się w kierunki rozwoju współczesnej inżynierii. W szczególności problem predykcji zużycia energii autonomicznych robotów mobilnych (AMR) oraz oceny wykonalności zadań transportowych ma istotne znaczenie zarówno

poznawcze, jak i aplikacyjne, zwłaszcza w kontekście systemów transportowych Przemysłu 4.0.

3.2. Wartość naukowa i oryginalność

Autor podjął się rozwiązania problemu, który pomimo rosnącego zainteresowania oraz upowszechnienia w praktyce przemysłowej pojazdów AGV/AMR nadal nie jest w pełni rozpoznany, szczególnie w odniesieniu do komercyjnych platform AMR o zamkniętej architekturze. W tym aspekcie należy pozytywnie ocenić ukierunkowanie pracy na realne warunki przemysłowe, co stanowi wyraźny atut tej rozprawy.

Zaproponowane modele predykcyjne (M1, M2, M3) bazują na znanych i sprawdzonych metodach analizy danych, takich jak regresja czy podejścia z użyciem narzędzia AutoML. Choć same metody nie są nowe, to ich zastosowanie w specyficznym kontekście badawczym, tj. predykcji zużycia energii w komercyjnych robotach mobilnych, można uznać za uzasadnione i wartościowe. Autor trafnie skoncentrował się na rozwiązaniach możliwych do praktycznego wdrożenia, co w przypadku pracy doktorskiej o profilu aplikacyjnym należy uznać za podejście właściwe.

3.3. Przegląd literatury

Przegląd literatury został przeprowadzony w sposób uporządkowany i obejmuje główne grupy metod stosowanych w predykcji zużycia energii (modele fizyczne, modele oparte na algorytmach sztucznej inteligencji czy modele hybrydowe). Stanowi on solidną podstawę do dalszych analiz i uzasadnienia podjętego tematu. Na wyróżnienie zasługuje też opracowane przez Doktoranta zestawienie porównawcze wybranych komercyjnych systemów FMS w kontekście ich integracji z innymi systemami, w tym zarządzania energią (Tabela 3, s. 26). Jest to istotne, ponieważ komercyjne systemy (o ile w ogóle) bazują jedynie na wartości progowej (*podejrzewam, że napięcia* [dop. własny]) przy wyznaczaniu odpowiedniego momentu ładowania akumulatora robota AMR. Zatem starania

Doktoranta stanowią ważny przyczynek do rozwiązania tego istotnego i praktycznego problemu.

3.4. Metodyka badań i część eksperymentalna

Na szczególne podkreślenie zasługuje opracowanie metodyki badawczej oraz przygotowanie stanowiska pomiarowego, umożliwiającego rejestrację danych operacyjnych i energetycznych robota. Autor wykazał się umiejętnością planowania eksperymentu oraz konsekwentnej realizacji założonych celów badawczych.

Zaproponowane podejście eksperymentalne jest spójne i adekwatne do postawionych celów. Warto jednak zauważyć, że co jest naturalne w warunkach realizacji pracy doktorskiej zakres badań ogranicza się do jednej platformy robota oraz określonego środowiska testowego. W przyszłych pracach interesujące byłoby:

- rozszerzenie badań na inne platformy AMR,
- dokonanie analizy wpływu bardziej zróżnicowanych warunków środowiskowych,
- zweryfikowanie modeli w szerszym zakresie scenariuszy operacyjnych, zwłaszcza pod kątem opracowania bardziej generalnego modelu, który mógłby zostać zaaplikowany do różnych typów robotów AMR.

2.4. Analiza wyników

Autor przeprowadził poprawną analizę wyników, wykazując przewagę modeli wieloparametrycznych nad modelem jednowymiarowym oraz identyfikując kluczowe czynniki wpływające na zużycie energii. Wyniki te są spójne z intuicją inżynierską i potwierdzają zasadność przyjętego podejścia. Chociaż patrząc z praktyki przemysłowej im mniej złożony model tym prostszy w implementacji.

W kontekście dalszego rozwoju badań można wskazać możliwość pogłębienia analizy poprzez:

- bardziej szczegółową interpretację zależności między zmiennymi, w tym ich potencjalną korelację,
- analizę przypadków o większych błędach predykcji,
- uwzględnienie aspektów związanych z niepewnością modeli.

Są to jednak naturalne kierunki rozwinięcia badań, wykraczające poza podstawowy zakres pracy doktorskiej.

2.5. Wartość aplikacyjna

Jednym z najważniejszych walorów pracy jest jej potencjał aplikacyjny. Autor trafnie identyfikuje ograniczenia istniejących systemów zarządzania flotą robotów, w których brakuje narzędzi umożliwiających ocenę wykonalności misji w oparciu o rzeczywiste zużycie energii.

Zaproponowane rozwiązanie może stanowić podstawę do dalszych prac wdrożeniowych. W przyszłości interesujące byłoby:

- bezpośrednie zintegrowanie modelu z systemem klasy FMS,
- ocena wpływu zastosowania modelu na efektywność operacyjną systemu,
- przeprowadzenie studiów przypadków w bardziej złożonym środowisku.

2.6. Ocena końcowa części merytorycznej

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Poskarta stanowi wartościowe opracowanie naukowe o wyraźnym charakterze aplikacyjnym. Autor wykazał się umiejętnością:

- identyfikacji istotnego problemu badawczego,
- zaprojektowania i przeprowadzenia badań eksperymentalnych,
- zastosowania odpowiednich metod analizy danych,
- formułowania wniosków o znaczeniu praktycznym.

Wskazane wcześniej uwagi mają charakter uzupełniający i wskazują potencjalne kierunki dalszego rozwoju badań, nie umniejszając przy tym jakości uzyskanych rezultatów.

4. Uwagi krytyczne

Pomimo pozytywnych aspektów przedstawionych w punkcie 3 tej recenzji prosiłbym Autora o ustosunkowanie się do poniższych uwag krytycznych.

- 4.1. W pracy pojawia się pojęcie rodzaju „napędu Akermana” – przykładowo tabela 7, s. 54. Rozumiem, że chodzi tutaj Autorowi o „Ackermann steering system”? Czy sformułowanie „napęd” jest fortune?
- 4.2. Na jakiej podstawie Autor w tabeli 8 określił „Łatwość wdrożenia” oraz „Zapotrzebowanie na dane do uzyskania stabilnych wyników czy Interpretowalność”? Przykładowo czym się różni „małe/średnie” od „średniego” zapotrzebowania na dane?
- 4.3. AutoML jest wysokopoziomowym narzędziem wyboru odpowiedniego modelu, w tym modelu bazującego na algorytmach sztucznej inteligencji. Działanie tego narzędzia kończy się przeważnie sugestią (na podstawie wybranych metryk) danego modelu, który najlepiej dopasowuje się do danych. Obawiam się, że nie traktowałbym AutoML jako modelu osobnej klasy, tak jak jest to ujęte np. w Tabeli 8 czy np. jako sformułowanie zadania 4U z tabeli 10 (s. 63).
- 4.4. Jakie miary cech sygnałów / zmiennych wejściowych (ang. features), które pojawiają się w tabeli 7 są najczęściej stosowane w modelach, które przedstawiono w przeglądzie literatury. Przydałoby się podać szczegółową metrykę, która Autor przedstawił w ostatniej kolumnie jako „Skuteczność”, żeby móc próbować porównać ilościowo te modele.
- 4.5. W rozdziale 3.4 w tabeli 12 przedstawiono wybrane metody oceny. Czy „ocena metryk (R^2)” jest na pewno metodą? Czy jest to po prostu parametr opisujący siłę korelacji modelu? Podobnie w zadaniu 10 pojawia się pojęcie „Wartości Shapleya” czy w zadaniu 11 wyznaczenie wartości metryk.
- 4.6. Przedstawione w pracy luki badawcze są sformułowane bardzo ostro. Proszę w kontekście poniższych publikacji podanych w linkach:

- o <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221721000217>

- <https://link.springer.com/article/10.1007/s10462-011-9227-9>
- https://www.robots.ox.ac.uk/~mobile/Papers/RAS2020_tomy.pdf
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221724009834>
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X25004929>
- <https://link.springer.com/article/10.1007/s00500-025-10851-1>
- <https://asmedigitalcollection.asme.org/dynamicsystems/article-abstract/137/3/031009/371688/Mission-Feasibility-Assessment-for-Mobile-Robotic>

o odpowiedź na pytanie czy niektóre z tych luk nie powinny być zdaniem Autora sformułowane bardziej ostrożnie? W kontekście obecnego stanu wiedzy bezpieczniejsze jest pisać nie o „braku”, lecz o:

- ograniczonej dojrzałości rozwiązań,
- niewystarczającej integracji z komercyjnymi FMS,
- niedostatecznej walidacji w rzeczywistych środowiskach przemysłowych,
- braku rozwiązań łączących energię, środowisko, diagnostykę i planowanie misji w jednym spójnym frameworku.

4.7. Model, który powstał z wykorzystaniem narzędzia AutoML (model M3) może być modelem podobnej klasy jak model M2. Nie do końca rozumiem, dlaczego model M2 występuje jako osobny byt w tej pracy, skoro i tak Autor stosuje narzędzie do automatycznego wyboru i fine-tuningu modelu. Być może warto byłoby zaakcentować w pracy, że model M2 jest wybrany „ręcznie”. Może on (model M2) być zarówno gorszy albo tak samo dobry jak model M3. Z punktu widzenia poznawczego ten model M2 wnosi mało. Skoro jest narzędzie AutoML to dlaczego Autor chciał pokazać jeszcze model M2?

4.8. Rys. 25 jest nieczytelny.

4.9. W rozdziale 4, można by także uwzględnić zakłócenia, które mogą się pojawić w trakcie przejazdu spowodowane przez np. pojawienie się przeszkód na trasie, które muszą zostać ominięte oraz takich, które

spowodują zatrzymanie robota i przejście w stan oczekiwania. Takie zdarzenia pojawia się często, zwłaszcza jeśli robot przejeżdża przez obszary, które mogą zajmować inni uczestnicy ruchu. Jak Autor spróbowałby uwzględnić takie czynniki w swoim modelu? Zdarzenie, które wywołuje ominięcie deterministycznie ustawionej(?) przeszkody pojawia się np. na rysunku 31.

- 4.10. Cele i szczegółowe opisy zadań pojawiają się najpierw w rozdziale 3 a potem w rozdziale 5. Warto byłoby to jakoś usystematyzować i „uspójnić” w jednym miejscu. Część bardziej szczegółowego opisu metodyki można byłoby przesunąć do Aneksu, a zostawić w pracy tylko główne opisy. Pomogłoby to na pewno w łatwiejszej percepcji pracy.
- 4.11. Rysunek 33 jest nieczytelny.
- 4.12. W tabeli 22 w pierwszym wierszu Autor wymienia różne „technologie komunikacji”. Nie wszystkie te pozycje są jednorodnie „technologiami komunikacji” w sensie metodologicznym. Zostały one zestawione razem praktycznie (inżyniersko), ale z punktu widzenia klasyfikacji naukowej to mieszanka różnych warstw i kategorii. Część z nich to protokoły komunikacyjne (MQTT, REST API, OPC UA) a reszta to technologie transmisji. Tabela porównuje więc „jabłka z gruszkami”.
- 4.13. Jak mierzony był parametr SoC opisany w rozdziale 6?
- 4.14. Jak Autor poradził sobie z potencjalnym ryzykiem overfittingu dla opracowanych modeli?
- 4.15. Jakie jest p-value dla modeli M1 i M2? Jak wygląda istotność cech w tej klasie modeli? Istnieją sposoby na wyznaczenie wielkości efektu dla przedstawionych modeli statystycznych.
- 4.16. W pracy wykorzystano współczynnik skorygowany AR-S jako miarę jakości dopasowania modeli, co należy ocenić pozytywnie. Jednocześnie interpretacja uzyskanych wartości powinna być rozpatrywana w kontekście liczby obserwacji, gdyż wysoka wartość AR-S przy ograniczonym zbiorze danych może wskazywać na ryzyko nadmiernego dopasowania modelu.

- 4.17. Rysunek 58 jest nieczytelny. Wiele rysunków nawet w wersji elektronicznej pracy jest trudne w odczycie. W wersji drukowanej czytelność jest jeszcze gorsza. Generalna jakość edycyjna pracy mogłaby być lepsza...
- 4.18. W pracy w rozdziale podsumowującym brakuje bezpośredniego odniesienia do zdefiniowanej luki badawczej i konkretnej odpowiedzi jak bardzo wyniki, które uzyskał Autor wypełniają ją.
- 4.19. Proszę o twarde wskazanie związku pracy z dyscypliną inżynieria mechaniczna. Praca dotyczy zagadnień z wielu dyscyplin, ale mam wrażenie, że aspekt mechaniczny czy inżynierii produkcji ustępuje zagadnieniom związanym z elektrotechniką, informatyką techniczną i telekomunikacją czy logistyką. Proszę zwrócić uwagę, że słowa kluczowe również akcentują robotykę mobilną, elektrotechnikę i intralogistykę.
- 4.20. W celu pracy Autor określił, że *„Opracowany model pozwoli na (...), zwiększając autonomię robota poprzez ocenę wykonalności zakolejkowanych zadań oraz wczesne wykrywanie zakłóceń”*. Proszę o wskazanie jak Autor oceniał wykonalność zakolejkowanych zadań w trakcie badań eksperymentalnych. Proszę o przedstawienie definicji formalnej „wykonalności zadania” oraz określenia czym jest wczesne wykrywanie zakłócenia. Według mojej opinii nie przedstawiono wprost bezpośredniej implementacji ani formalizacji mechanizmu oceny wykonalności zadań (np. w kontekście kolejki zadań lub harmonogramowania), ani procedur związanych z detekcją zakłóceń (czy wykrywania anomalii) w trakcie eksploatacji systemu. Nie przedstawiono również konkretnych dowodów w postaci wyników badań eksperymentalnych, które wskazywałyby na osiągnięcie wprost tego aspektu.
- 4.21. Proszę o opisanie jakie są ograniczenia opracowanych modeli w kontekście zmienności warunków środowiskowych (np. różne typy nawierzchni/posadzki, nachylenia dróg transportowych, najazdów i ramp)?
- 4.22. Model M3 osiąga najwyższą dokładność, jednak kosztem interpretowalności. Jak Autor ocenia możliwość jego praktycznego wdrożenia w systemach przemysłowych? Co z modelami xAI?

4.23. W jakim stopniu degradacja akumulatora w czasie wpływa na stabilność predykcji modelu? Czy autor brał pod uwagę to zjawisko na etapie przeprowadzonych prac badawczych.

Sformułowane przeze mnie uwagi, które przedstawiłem w tym punkcie nie obniżają ogólnej pozytywnej oceny pracy, a mają na celu pogłębienie dyskusji naukowej.

5. Konkluzja

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Bartosza Poskarta dotyczy aktualnego i ważnego problemu naukowego z zakresu inżynierii mechanicznej i intralogistyki. Autor wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, poprawnego formułowania problemów badawczych oraz stosowania odpowiednich metod analitycznych i eksperymentalnych.

Praca wnosi istotny wkład do rozwoju metod predykcji zużycia energii w autonomicznych robotach mobilnych oraz posiada wyraźny potencjał aplikacyjny w sferze gospodarczej.

Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że opiniowana dysertacja Pana mgra inż. Bartosza Poskarta pt. „Wieloparametryczny model zużycia energii autonomicznego robota mobilnego do predykcji wykonalności zadań transportowych” spełnia wymagania określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) i może być podstawą do nadania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Bartosza Poskarta do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

dr hab. inż. Tomasz Bartkowiak, prof. PP