

Dr hab. inż. Andrzej Kochan, prof. PW
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu
Zakład Sterowania Ruchem i Infrastruktury
Transportu
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
e-mail: andrzej.kochan@pw.edu.pl

Warszawa, 3 lutego 2026 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor: mgr inż. Sebastian Kałuża

Tytuł rozprawy: *Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji*

Promotor: prof. dr hab. inż. Marek Sitarz

Promotor pomocniczy: dr inż. Paweł Buchwald

Jednostka: Akademia WSB w Dąbrowie Górniczej

Podstawy formalne opracowania recenzji:

- pismo Dziekana dr hab. Katarzyna Szczepańska Woszczyna, prof. AWSB z dn. 5.11.2025;
- uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport nr 5/2025/2026 z dnia 29.10.2025;
- egzemplarz rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Kałuży w wersji drukowanej oraz elektronicznej.

Uwzględnione podstawy prawne podczas opracowania recenzji rozprawy doktorskiej:

- Ustawa z dnia 20.07.2018 r. – „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.),
- Obwieszczenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 12.02.2025 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz.U. 2025 poz. 211).

1. Ocena zgodności tematu pracy z dyscypliną naukową

Tematyka rozprawy doktorskiej w pełni mieści się w zakresie dyscypliny **inżynieria lądowa, geodezja i transport**, ze szczególnym uwzględnieniem inżynierii transportu szynowego oraz diagnostyki infrastruktury kolejowej. Praca podejmuje aktualny i istotny problem automatyzacji oceny stanu nawierzchni torowej z wykorzystaniem nowoczesnych metod inspekcji wizyjnej oraz algorytmów sztucznej inteligencji, co wpisuje się w światowe trendy cyfryzacji i inteligentnego utrzymania infrastruktury transportowej.

2. Ocena celu pracy i sformułowania problemu badawczego

Cel pracy został sformułowany w sposób jednoznaczny i poprawny metodologicznie. Autor zakłada **opracowanie i ocenę systemu diagnostycznego do automatycznej detekcji wad powierzchniowych szyn i podkładów kolejowych**, umożliwiającego wyznaczenie stopnia ich degradacji z wykorzystaniem inspekcji wizyjnej i algorytmów sztucznej inteligencji.

Ponadto Autor zdefiniował następujące cele cząstkowe,

– poznawcze:

1. Analiza porównawcza tradycyjnej (manualny obchód torów) i nowej metody inspekcji nawierzchni torowej: porównanie skuteczności i dokładności manualnych metod z opracowanym systemem diagnostycznym wykorzystującym sztuczną inteligencję do identyfikacji wad oraz ocenie stopnia degradacji.

2. Wpływ automatyzacji na planowanie utrzymania infrastruktury: Zbadanie, jak zastosowanie sztucznej inteligencji i wizji komputerowej może wspierać długoterminowe zarządzanie infrastrukturą, przez dokładniejsze planowanie prac utrzymaniowych.

– metodyczne:

1. Rozwój algorytmów uczenia maszynowego: Adaptacja algorytmów uczenia maszynowego do analizy danych z opracowanego urządzenia diagnostycznego w celu automatycznego wykrywania wad szyn i podkładów. Algorytmy te zostaną zoptymalizowane pod kątem specyficznych wymagań infrastruktury kolejowej oraz różnych warunków eksploatacyjnych. Celem jest umożliwienie detekcji wad z dokładnością co najmniej 90%.

2. Rozwój modelu oceny degradacji na podstawie inspekcji wizyjnej: Opracowanie i weryfikacja modelu imperatywnego, który pozwala na ocenę stopnia degradacji szyn i podkładów, bazując na danych z systemu inspekcji wizyjnej.

– aplikacyjne:

1. Redukcja kosztów utrzymania infrastruktury torowej: Zbadanie wpływu zastosowania inspekcji wizualnej na obniżenie kosztów utrzymania infrastruktury.

2. Weryfikacja skuteczności opracowanego systemu w warunkach polskiej infrastruktury kolejowej: Testowanie opracowanego systemu w polskich warunkach, aby wykazać jego zgodność z instrukcjami utrzymaniowymi oraz jego użyteczność dla zarządców infrastruktury.

Ukierunkowując swoje badania Autor sformułował następującą hipotezę:

Zastosowanie opracowanego systemu inspekcji wizyjnej wspieranego przez algorytmy sztucznej inteligencji umożliwi automatyczną identyfikację wad nawierzchni torowej z dokładnością o 15-30% wyższą niż tradycyjne metody manualne, skracając czas inspekcji o około 40-50% i redukując koszty inspekcji torów o 20-30%.

Autor zdefiniował następujące wskaźniki w celu potwierdzenia hipotezy głównej:

- Wskaźnik dokładności identyfikacji wad: Procentowy wzrost wykrywalności wad szyn oraz podkładów w porównaniu do tradycyjnych obchodów torów.
- Wskaźnik skrócenia czasu inspekcji: Procentowa redukcja czasu potrzebnego na wykonanie inspekcji torów w stosunku do standardowych procedur.
- Wskaźnik redukcji kosztów utrzymania infrastruktury torowej: Procentowa oszczędność kosztów inspekcji torów.

Problem naukowy został jasno zidentyfikowany i wynika bezpośrednio z ograniczeń stosowanych obecnie metod manualnych oraz komercyjnych systemów diagnostycznych, które – mimo wysokiego poziomu rozwoju technologicznego – nie zapewniają pełnej automatyzacji procesu oceny degradacji nawierzchni torowej.

3. Ocena przeglądu literatury i stanu wiedzy

Przegląd literatury został opracowany bardzo starannie i obejmuje szeroki zakres zagadnień związanych z diagnostyką infrastruktury kolejowej, systemami wizyjnymi oraz zastosowaniem metod sztucznej inteligencji. Autor przeanalizował **ponad 180 pozycji**

bibliograficznych, w tym artykuły naukowe, monografie, normy, instrukcje branżowe oraz źródła internetowe. Artykuły naukowe pochodzą ze uznanych czasopism naukowych takich jak:

- *Construction and Building Materials*,
- *Engineering Structures*,
- *Sensors*,
- *IEEE Access* / publikacje konferencyjne IEEE,
- *Measurement*,
- *Journal of Rail and Rapid Transit* (IMEchE),
- *Transportation Research* (wybrane serie),
- *Automation in Construction*.

Na szczególną uwagę zasługuje rozdział poświęcony **przeglądowi komercyjnych wdrożeń systemów wizyjnych**, w którym dokonano krytycznej analizy istniejących rozwiązań pod kątem funkcjonalności, automatyzacji oraz możliwości integracji z systemami utrzymaniowymi. Przegląd ten stanowi solidną podstawę do sformułowania własnych rozwiązań badawczych i projektowych.

Należy podkreślić że Autor sprawnie posługuje się bibliografią. Cytowania pojawiają się w kluczowych miejscach pracy:

- we *Wprowadzeniu* – do uzasadnienia aktualności problemu,
- w *przeglądzie stanu wiedzy* – do porównania metod i rozwiązań,
- w *części metodycznej* – do osadzenia autorskich rozwiązań w istniejących podejściach,
- w *analizie wyników* – do odniesienia rezultatów do wcześniejszych badań.

Literatura nie jest cytowana mechanicznie – autor:

- wykorzystuje ją do budowy argumentacji,
- wskazuje ograniczenia istniejących metod,
- uzasadnia potrzebę opracowania własnego rozwiązania.

Widoczna jest spójność między treścią a bibliografią:

- pozycje cytowane w tekście odpowiadają rzeczywistym zagadnieniom omawianym w danym fragmencie,
- nie występują liczne „martwe” pozycje, które nie mają odwołań w tekście.

4. Ocena metodyki badań i zastosowanych metod

Metodyka badań została zaprojektowana w sposób logiczny, spójny i adekwatny do postawionego celu pracy. Autor szczegółowo opisał proces projektowania autorskiego algorytmu oceny stopnia degradacji szyn i podkładów, uwzględniając zarówno **częstość występowania wad**, jak i ich **rozmieszczenie przestrzenne**, co stanowi istotny wkład metodyczny.

Autor zastosował kilka metod badawczych sprawnie komponując rozwiązanie zdefiniowanego problemu badawczego. Należą do nich

a) Inspekcja wizyjna nawierzchni torowej

- pozyskiwanie danych obrazowych z kamer instalowanych na pojeździe szynowym,
- rejestracja danych w różnych warunkach eksploatacyjnych.

metoda **zastosowana praktycznie**, nie tylko opisana.

b) Algorytmy analizy obrazu i elementy AI

- detekcja i klasyfikacja wad szyn i podkładów,
- automatyczna identyfikacja obszarów uszkodzeń,
- przetwarzanie dużych zbiorów danych wizyjnych.

metoda **centralna dla pracy**.

c) Autorska metoda oceny stopnia degradacji

- wyznaczanie frakcji segmentów z wadami,
- analiza średnich odległości między wadami,
- agregacja wyników w postaci wskaźników degradacji.

metoda **oryginalna**, stanowiąca główny wkład naukowy.

d) Metoda porównawcza z inspekcją manualną

- zestawienie wyników systemu automatycznego z oceną toromistrza,
- analiza rozbieżności i subiektywności ocen ludzkich.

kluczowa metoda weryfikacyjna hipotezy.

e) Analiza efektywności i bezpieczeństwa

- porównanie kosztów i nakładów pracy,
- analiza ryzyka związanego z obchodami pieszymi,
- ocena potencjału wdrożeniowego.

metoda wspierająca wnioski aplikacyjne.

Metody te są poprawne z punktu widzenia naukowego i dobrze udokumentowane matematycznie oraz algorytmicznie .

5. Ocena uzyskanych wyników i ich odniesienie do stanu wiedzy

Uzyskane wyniki badań potwierdzają możliwość skutecznego zastosowania inspekcji wizyjnej wspieranej sztuczną inteligencją w diagnostyce nawierzchni torowej. Autor wykazał, że opracowany system umożliwia **obiektywną i powtarzalną ocenę stopnia degradacji szyn i podkładów**, przewyższając pod tym względem metody manualne oraz wybrane rozwiązania komercyjne.

Opracowana metoda została zwalidowana empirycznie na danych rzeczywistych poprzez porównanie wyników systemu wizyjnego z wynikami tradycyjnej diagnostyki manualnej oraz analizę powtarzalności i użyteczności eksploatacyjnej uzyskiwanych rezultatów.

Wyniki zostały poprawnie zinterpretowane i odniesione do aktualnego stanu wiedzy, a ich analiza wskazuje na realny potencjał wdrożeniowy opracowanego rozwiązania. Praca wnosi nową jakość w zakresie integracji algorytmów AI z procesami utrzymania infrastruktury kolejowej .

6. Oryginalność i wkład naukowy autora

Rozprawa zawiera **oryginalne rozwiązania naukowe i aplikacyjne**, w szczególności autorską metodę wyznaczania stopnia degradacji nawierzchni torowej na podstawie danych wizyjnych. Autor przeprowadził również analizę czystości patentowej, wykazując brak kolizji z istniejącymi rozwiązaniami, co potwierdza nowatorski charakter pracy . Wkład naukowy pracy należy ocenić jako istotny, zarówno z punktu widzenia teorii diagnostyki infrastruktury, jak i praktyki inżynierskiej.

Do najważniejszych osiągnięć doktoranta należy zaliczyć:

- **Sformułowanie i rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego** polegającego na opracowaniu metody automatycznej oceny stopnia degradacji

szyn i podkładów kolejowych z wykorzystaniem inspekcji wizyjnej i algorytmów sztucznej inteligencji.

- **Opracowanie autorskiej metody oceny stopnia degradacji nawierzchni torowej**, która integruje częstość występowania wad oraz ich rozmieszczenie przestrzenne, umożliwiając ilościową i powtarzalną ocenę stanu technicznego infrastruktury.
- **Zaprojektowanie i implementacja algorytmu diagnostycznego**, zdolnego do przetwarzania danych wizyjnych pozyskiwanych w warunkach rzeczywistej eksploatacji kolejowej, w szerokim zakresie prędkości i zmiennych warunków środowiskowych.
- **Przeprowadzenie szerokiej analizy porównawczej istniejących komercyjnych systemów diagnostycznych**, która pozwoliła na identyfikację ich ograniczeń funkcjonalnych i uzasadnienie potrzeby opracowania nowego rozwiązania.
- **Empiryczną weryfikację zaproponowanej metody na danych rzeczywistych**, w tym porównanie wyników systemu wizyjnego z wynikami tradycyjnych inspekcji manualnych, co potwierdziło użyteczność i wiarygodność opracowanego rozwiązania.
- **Wykazanie potencjału praktycznego i wdrożeniowego opracowanego systemu**, w szczególności w zakresie poprawy bezpieczeństwa pracy personelu, redukcji kosztów utrzymania infrastruktury oraz zwiększenia efektywności procesów diagnostycznych.
- **Przeprowadzenie analizy czystości patentowej**, potwierdzającej nowatorski charakter zaproponowanego rozwiązania oraz brak kolizji z istniejącymi zgłoszeniami patentowymi.

7. Możliwości dalszych badań

Autor trafnie wskazał potencjalne kierunki dalszych badań, obejmujące m.in. rozszerzenie funkcjonalności systemu o diagnostykę podsypki i przytwierdzeń, zwiększenie odporności algorytmów na zmienne warunki środowiskowe oraz pełną industrializację rozwiązania. Kierunki te są uzasadnione i logicznie wynikają z przeprowadzonych badań.

8. Uwagi krytyczne

Do pracy sformułowano następujące uwagi:

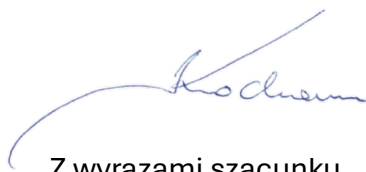
- a. W niektórych fragmentach pracy zauważalna jest tendencja do nadmiernie rozbudowanego opisu kontekstu technicznego kosztem bardziej syntetycznego przedstawienia wyników ilościowych, a także brak pełnej analizy porównawczej z danymi długookresowymi pochodzącymi z eksploatacji sieci kolejowej.
- b. Zakres walidacji metody ograniczony jest do wybranych odcinków infrastruktury, co – mimo poprawności przeprowadzonych badań – nie pozwala w pełni ocenić zachowania algorytmu w długim horyzoncie czasowym ani przy bardzo zróżnicowanych warunkach eksploatacyjnych.
- c. Brakuje **pogłębionej analizy wrażliwości algorytmu** na zmiany parametrów wejściowych, w szczególności przyjętych wag i progów decyzyjnych, co mogłoby lepiej uzasadnić ich uniwersalność dla różnych kategorii linii kolejowych.
- d. **Porównanie wyników z diagnostyką manualną** ma charakter jakościowo-ilościowy, jednak nie zostało uzupełnione o formalne miary statystyczne zgodności, co mogłoby dodatkowo wzmocnić wnioski dotyczące skuteczności metody.
- e. Opis zastosowanych **algorytmów sztucznej inteligencji** miejscami ma **charakter funkcjonalny, a nie stricte analityczny** , co może utrudniać pełną replikowalność badań przez innych badaczy.
- f. Analiza porównawcza z istniejącymi systemami komercyjnymi opiera się głównie na deklarowanych parametrach producentów, a nie na jednolitych testach eksperymentalnych, co ogranicza możliwość bezpośredniego porównania skuteczności rozwiązań.
- g. W pracy niewystarczająco rozwinięto **zagadnienie odporności systemu na skrajne warunki środowiskowe** , takie jak intensywne zabrudzenia, opady czy zmienne oświetlenie, które w praktyce eksploatacyjnej mogą istotnie wpływać na jakość danych wizyjnych.
- h. Część wnioskowa mogłaby zostać bardziej skondensowana i silniej powiązana z hipotezą badawczą, tak aby w sposób jeszcze bardziej jednoznaczny wskazać, które wyniki bezpośrednio ją potwierdzają.

Uwagi te nie mają jednak istotnego wpływu na ogólną wartość naukową rozprawy. Proszę o odniesienie się do uwag, w szczególności do pozycji z wyróżnionymi zagadnieniami.

9. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Kałuży „**Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji**” spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim określone obowiązującą Ustawą z dn. 20.07.2018 roku „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.). Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, wnosi istotny wkład do rozwoju dyscypliny oraz charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym i metodycznym.

Wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



Z wyrazami szacunku

dr hab. inż. Andrzej Kochan, prof. uczelni