



dr hab. inż. Maciej Szkoda, prof. PK
Politechnika Krakowska
Katedra Pojazdów Szynowych i Transportu

Kraków, 22 grudnia 2025 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Sebastiana Kałuży pt.: „Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji”.

Podstawą wykonania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Akademii WSB nr 5/2025/2026 z dnia 29 października 2025 roku. Praca doktorska mgr inż. Sebastiana Kałuży została przygotowana w trybie art. 190 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jedn. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.). Zgodnie z art. 187 ustawy „Rozprawa doktorska, powinna prezentować ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne”.

Recenzja została podzielona na pięć części, w których odpowiednio przedstawiono: 1. Ogólną charakterystykę pracy, 2. Ocenę podjętego tematu, 3. Analizę treści pracy, 4. Uwagi szczegółowe do pracy i 5. Konkluzję końcową. Zawarto w nich uzasadnienie podjęcia tematu pracy, odniesienie do struktury i celu pracy, jak również przedstawiono wnioski końcowe.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Praca doktorska mgr inż. Sebastiana Kałuży pt.: „Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji” została napisana pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Marka Sitarza i promotora pomocniczego dra inż. Pawła Buchwalda.

Praca składa się z 15 rozdziałów, spisu bibliografii, spisu tabel, rysunków i wykresów. Praca liczy łącznie 309 stron, z czego tekst zasadniczy to 292 strony. Na bibliografię (łącznie 217 pozycji) składają się zwarte pozycje książkowe, artykuły z czasopism, raporty naukowe,

akty prawne oraz źródła internetowe. Doktorant wykorzystał w pracy zarówno literaturę polską, jak i obcojęzyczną (głównie w języku angielskim).

W pierwszej części pracy Doktorant przedstawił analizę stanu wiedzy z obszaru diagnostyki utrzymania torów, wizji komputerowej i sztucznej inteligencji. Cele pracy i hipotezę badawczą opisano w rozdziale 2.6.2. W kolejnym rozdziale dokonano szczegółowej charakterystyki aktualnie stosowanej przez krajowego zarządcę infrastruktury kolejowej PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. metody oceny stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej oraz nowego, opracowanego systemu diagnostycznego do inspekcji wizyjnej szyn i podkładów kolejowych, wykorzystujący układy optyczne oraz algorytmy sztucznej inteligencji. Kolejne rozdziały pracy poświęcone są zdefiniowaniu wymagań technicznych i funkcjonalnych projektowanego systemu, budowie stanowiska badawczego do detekcji wad nawierzchni torowej, opracowaniu wstępnego prototypu urządzenia diagnostycznego do detekcji wad szyn i podkładów, sprecyzowaniu konfiguracji modeli sieci neuronowych oraz budowie finalnej wersji systemu diagnostycznego. W rozdziale 13 przedstawiono wyniki badań eksploatacyjnych nowego systemu diagnostycznego przeprowadzonych na linii kolejowej nr 250 (Gdańsk Śródmieście – Rumia Janowo). W dalszej części pracy dokonano porównania nowej metody inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej opartej na sztucznej inteligencji z aktualnie stosowaną metodą opartą na instrukcji PKP PLK S.A. Id-1 „Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych”. W rozdziale 15 sformułowano wnioski końcowe odnoszące się do celów pracy.

Układ pracy jest przejrzysty, podział treści rozprawy na rozdziały i podrozdziały poprawny. Materiały graficzne (rysunki, schematy, mapy) oraz tabele z wynikami zamieszczone w pracy, w sposób właściwy przedstawiają studia doktorantki, które dotyczą badań zrównoważonego rozwoju transportu kolejowego oraz integracji systemów technicznych z ochroną bioróżnorodności.

2. Ocena podjętego tematu

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Kałuży poświęcona jest zagadnieniu automatycznej diagnostyki infrastruktury kolejowej, ze szczególnym uwzględnieniem inspekcji szyn i podkładów przy użyciu systemu wizyjnego wspieranego przez algorytmy sztucznej inteligencji.

Praca wpisuje się w aktualne kierunki rozwoju transportu kolejowego, odpowiadając na rosnące zapotrzebowanie na nowe, zautomatyzowane narzędzia diagnostyczne, które wspierają cyfrową transformację zarządzania infrastrukturą torową. Praca ma aspekt naukowy i praktyczny. Z jednej strony, przedstawione badania wzbogacają osiągnięcia naukowe w obszarze analizy danych wizualnych i uczenia maszynowego w kontekście infrastruktury torowej, z drugiej dostarczają realnych rozwiązań wspierających jakość utrzymania torów, poprawę bezpieczeństwa ruchu pojazdów i możliwość obniżenia kosztów operacyjnych.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia uważam, że wybór tematu rozprawy jest aktualny i istotny dla transportu kolejowego w Polsce.

3. Analiza treści pracy doktorskiej

W przedstawionej do recenzji rozprawie Doktorant podjął się zadania związanego z opracowaniem, budową oraz oceną w warunkach laboratoryjnych, stanowiskowych i eksploatacyjnych systemu diagnostycznego do inspekcji wizyjnej szyn i podkładów kolejowych, wykorzystującego układy optyczne oraz algorytmy sztucznej inteligencji.

Analiza aktualnego stanu wiedzy przeprowadzona przez doktoranta w rozdziale 2 z obszaru diagnostyki infrastruktury kolejowej i wykorzystania sztucznej inteligencji w diagnostyce nawierzchni torowej wykazała, że rosnąca złożoność danych wizyjnych oraz zróżnicowanie warunków środowiskowych sprawiają, że tradycyjne algorytmy przetwarzania obrazu o ograniczonej złożoności stają się niewystarczające. W odpowiedzi na te wyzwania coraz większą rolę odgrywa sztuczna inteligencja, a zwłaszcza metody uczenia maszynowego i głębokiego uczenia (Deep Learning). Poza analizą literatury i identyfikacją projektów badawczych (m.in. projekt DB Netz AG „Predictive Maintenance 4.0” dotyczący platformy DIANA), doktorant na zakończenie przeglądu stanu wiedzy przeprowadził analizę rynkową dostępnych systemów diagnostycznych opartych na technologii wizyjnej, wykorzystywanych do automatycznej detekcji wad nawierzchni torowej tj.: Goldsmith, Mermec Vcube, Pavemetrics, DMA Srl (TCVIS), RailTechnology, ENSCO TCIS i Omnivision BelfourBeatty. Wybrane systemy zostały ocenione pod kątem parametrów pomiarowych, funkcjonalności, możliwości instalacyjnych i integracji z oprogramowaniem. Ocena wykazała, że mimo wysokiej jakości podstawowych funkcji, aktualnie dostępne na rynku, komercyjne rozwiązania nie zapewniają pełnej automatyzacji procesu.

Przeprowadzona analiza literatury, analiza zrealizowanych projektów badawczych oraz dostępnych rozwiązań rynkowych umożliwiła wyciągnięcie wniosków, że tradycyjne metody diagnostyki infrastruktury kolejowej, oparte na manualnych obchodach i subiektywnej ocenie toromistrzów, nie spełniają współczesnych wymagań dotyczących precyzji, powtarzalności oraz efektywności monitorowania stanu technicznego torów. Doktorant na podstawie analizy aktualnego stanu wiedzy zidentyfikował trzy istotne luki badawcze, m.in.:

1. Brak porównania dokładności metod manualnych i wizyjnych,
2. Brak systemów oceniających stopień degradacji elementów nawierzchni torowej z rozbudowaną funkcjonalnością diagnostyczną,
3. Brak analiz wpływu automatyzacji diagnostyki opartej na sztucznej inteligencji na procesy zarządzania infrastrukturą kolejową.

Na podstawie wniosków ze studium analitycznego w punkcie 2.6.2 Doktorant sformułował **cel główny pracy**, którym było opracowanie i ocena systemu diagnostycznego

do detekcji wad powierzchniowych szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji.

Z kolei postawiona **hipoteza badawcza** głosi, że 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%. W celu potwierdzenia tej hipotezy zdefiniowano trzy wskaźniki:

1. Wskaźnik dokładności identyfikacji wad,
2. Wskaźnik skrócenia czasu inspekcji,
3. Wskaźnik redukcji kosztów utrzymania infrastruktury torowej.

Poza celem głównym i hipotezą badawczą sformułowano również cele częściowe i cele aplikacyjne. **Cele aplikacyjne to:**

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

Istotnym wkładem Doktoranta w osiągnięcie postawionego celu pracy było opracowanie autorskiej metody oceny stopnia degradacji szyn i podkładów, opracowanej na potrzeby systemów diagnostycznych wykorzystujących technologię inspekcji wizyjnej. Zaproponowane rozwiązanie, opisane w rozdz. 3 pracy, opiera się na algorytmie, który umożliwia ilościową ocenę stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej – bez konieczności identyfikacji konkretnych typów wad. Metoda została zaprojektowana jako narzędzie wspierające procesy diagnostyczne, z zamiarem zapewnienia zgodności z obowiązującymi wytycznymi największego polskiego zarządcy infrastruktury – PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Opracowany algorytm składa się z trzech etapów:

1. Klasyfikacja i detekcja wad,
2. Estymacja lokalnych wskaźników degradacji (G_s i G_p),
3. Obliczenie końcowych wskaźników degradacji dla badanego odcinka toru.

Schemat przetwarzania danych uczenia maszynowego przedstawiono na rysunku 6, a do ilościowej oceny stanu elementów nawierzchni torowej zaproponowano wskaźnik degradacji szyn G_s i wskaźnik degradacji podkładów G_p . Wskaźniki te wraz z ich interpretacją opisano szczegółowo w pkt. 3.2.1 i 3.2.2.

Kolejnym etapem pracy było zdefiniowanie wymagań technicznych i funkcjonalnych projektowanego systemu, które zapewniłyby zgodność z rzeczywistymi potrzebami użytkowników oraz uwarunkowaniami wynikającymi z eksploatacji w środowisku

kolejowym. W identyfikacji wymagań uwzględniono kluczowe normy kolejowe zapewniające bezpieczną integrację urządzeń pokładowych z systemem wizyjnym.

Określenie wymagań technicznych stanowiło podstawę do budowy stanowiska badawczego do detekcji wad nawierzchni torowej. Stanowisko umożliwiło dobór optymalnych komponentów sprzętowych (kamer, oświetlenia, systemu sterowania) oraz wstępną walidację działania algorytmów detekcji w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. W rozdziale 5 opisano budowę stanowiska oraz wyniki przeprowadzonych testów laboratoryjnych wraz z oceną ich dokładności. Testy te pozwoliły zweryfikować jakość obrazów uzyskiwanych przez kamerę liniową przy różnych konfiguracjach oraz ocenić wpływ parametrów pracy (prędkości, ekspozycji, oświetlenia) na wykrywalność typowych wad szyn i podkładów. Stanowisko i wyniki badań stanowiło istotny etap przygotowania prototypu urządzenia diagnostycznego i badań eksploatacyjnych zrealizowanych na bocznicy kolejowej PKP Intercity S.A., Warszawa Grochów. Prototyp został dostosowany do warunków eksploatacyjnych i zabudowany na wózku motorowym typu WM15-A. Główny moduł wizyjny zawiera pięć zsynchronizowanych kamer liniowych Basler Racer raL4096-24gm, rozmieszczonych na odpowiedniej szerokości w celu objęcia jak najszerzego przekroju toru. Kamery te zapewniają wysoką rozdzielczość (4096 pikseli) i szybkie rejestrowanie (do 27 kHz), co umożliwiło szczegółowe odwzorowanie szyn i podkładów nawet przy dużych prędkościach przejazdu. Głównym celem testów była ocena dokładności weryfikacji wad infrastruktury torowej oraz sprawdzenie niezawodności modułu zainstalowanego na pojeździe WM15-A. Podczas przejazdów testowych zwracano uwagę na zachowanie konstrukcji (mocowanie kamer, tłumienie drgań) oraz na wpływ drgań i zmiennych warunków (nierówności toru, zmienne oświetlenie) na jakość rejestrowanych obrazów.

Cel pracy było opracowanie systemu diagnostycznego z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji, stąd w rozdziałach 7-10 Doktorant opisał proces doboru i konfiguracji modeli sieci neuronowych zastosowanych w systemie inspekcji oraz przygotowanie i przetwarzanie zebranych danych wizyjnych. Omówiono kolejno wybór odpowiedniej architektury sieci neuronowych dostosowanych do specyfiki zadania, sposób pozyskania i ręcznego etykietowania (anotacji) zdjęć torowiska, a także techniki przygotowania danych (augmentacja, generowanie obrazów tła) w celu zwiększenia efektywności uczenia. Wstępne trenowanie modeli na przygotowanych danych potwierdziło z jednej strony dokładność zaproponowanego podejścia (modele były w stanie wykryć istotne wady), a z drugiej ujawniło obszary wymagające poprawy – głównie konieczność zwiększenia zróżnicowanych danych w celu podniesienia dokładności detekcji. Końcowe trenowanie i testowanie modeli sieci neuronowych oraz ocenę dokładności wykrywania wad Doktorant przedstawił w rozdziale 8. W celu udoskonalenia systemu pomiarowego, zarówno od strony mechanicznej, jak i od strony modeli sieci neuronowych w zakresie zbioru danych wizyjnych, opracowano mobilny wózek pomiarowy. Umożliwiło to rozszerzenie liczby przykładów

(danych treningowych) pozyskanych od prototypu systemu zainstalowanego na pojeździe typu WM15-A. Dzięki mobilnej konstrukcji urządzenia możliwe było pozyskiwanie zdjęć z nawierzchni torowej wyłączanej z ruchu (m.in. bocznicę kolejową byłej Fabryki Samochodów Osobowych, bocznicę zakładów chemicznych CIECH Sarzyna S.A.) charakteryzującej się znacznym poziomem degradacji, jak również prowadzenie obserwacji niezależnie od warunków atmosferycznych i pory roku. Dane zebrane przy użyciu wózka pomiarowego posłużyły do rozbudowy zbioru obrazów nawierzchni torowej wykorzystywanych w procesie uczenia modeli. Ujęcia wykonane w zróżnicowanych warunkach oświetleniowych, na różnych tłach i przy odmiennych stanach technicznych toru pozwoliły zwiększyć reprezentatywność i różnorodność materiału treningowego. Zgromadzony materiał badawczy umożliwił zwiększenie jakości detekcji wad szyn i podkładów oraz poprawił efektywność sieci neuronowych, co może przełożyć się na dokładniejszą predykcję zużycia elementów infrastruktury.

Na podstawie przeprowadzonych analiz, testów i badań, doktorant opracował ostateczną, docelową wersję systemu diagnostycznego do inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej. W rozdziale 11 przedstawiono wymagania techniczno-funkcjonalne, jakim powinien sprostać system, jego architekturę sprzętowo-programową, sposób integracji z pojazdem kolejowym oraz wyniki testów przeprowadzonych na docelowej infrastrukturze. W celu zachowania wysokiego potencjału wdrożeniowego rozwiązania budowa systemu uwzględniała wymagania jakie zostały określone przez doktoranta we współpracy z zarządcami infrastruktury kolejowej oraz podmiotami odpowiedzialnymi za jej utrzymanie, tj. Network Rail UK, Metro Copenhagen, Polskie Linie Kolejowe Centrum Diagnostyki, PKP SKM w Trójmieście oraz PKP Intercity S.A., Biuro Infrastruktury. Prace nad docelową wersją systemu diagnostycznego obejmowały trzy etapy:

1. Prace konstrukcyjne – obejmujące rozmieszczenie podzespołów, opracowanie mocowań oraz dostosowanie konstrukcji urządzenia do wymagań montażowych pojazdów kolejowych,
2. Prace elektroniczne – związane z doбором oraz integracją komponentów elektronicznych, w tym kamer, jednostek obliczeniowych oraz systemów przechowywania danych,
3. Prace programistyczne – mające na celu dostosowanie oprogramowania systemu inspekcji wizyjnej, optymalizację algorytmów przetwarzania obrazu oraz wdrożenie nowych funkcjonalności w zakresie diagnostyki i analizy wyników.

Opracowany system diagnostyczny ma budowę modułową i możliwy jest do instalacji na różnych typach pojazdów szynowych, co pozwala prowadzić inspekcje torów w trakcie standardowych operacji kolejowych bez negatywnego wpływu na przepustowość badanych odcinków torowych.

Poza badaniami laboratoryjnymi i terenowymi na bocznicach, system został zweryfikowany poprzez badania eksploatacyjne przeprowadzone na linii kolejowej nr 250 (Gdańsk Śródmieście – Rumia Janowo). Badania obejmowały dwukrotną inspekcję obu torów linii kolejowej nr 250, podczas której zebrano dane dla około 120 km torowiska. System diagnostyczny został zamontowany na przyczepie wózka motorowego należącego do Zarządcy Infrastruktury PKP SKM w Trójmieście i rejestrował obrazy torowiska w trakcie przejazdu.

Badania dowiodły, że opracowany system diagnostyczny prawidłowo funkcjonuje w środowisku rzeczywistym – kamery i oświetlacze sprawdziły się w zmiennych warunkach pogodowych i oświetleniowych, a algorytmy poprawnie analizowały obraz przy różnych prędkościach jazdy skutecznie oceniając stan techniczny szyn i podkładów. Automatyczna inspekcja wizyjna umożliwiła szczegółowe sklasyfikowanie stopnia degradacji, dostarczając kompleksowych danych w formie numerycznej oraz obrazowej. Pomimo wysokiej dokładności wskazań, Doktorant stwierdził, że zaproponowane rozwiązanie wymaga dodatkowej weryfikacji przez operatora lub eksperta. Obecnie wykorzystywane algorytmy identyfikują wady powierzchniowe na podstawie cech wizualnych, ale nie posiadają jeszcze pełnej klasyfikacji typów wad. W praktyce oznacza to, że operator musi zweryfikować wskazania systemu diagnostycznego, podejmując ostateczną decyzję o kwalifikacji wskazanych wad oraz zakresie niezbędnych działań interwencyjnych.

Ocenę efektywności wdrożenia nowej metody inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej opartej na sztucznej inteligencji dokonano w porównaniu do aktualnie stosowanej metody opartej na manualnych inspekcjach toromistrzów. Podczas takich inspekcji toromistrz dokonuje wizualnej oceny stanu szyn, podkładów, przytwierdzeń, podsypki, słupów trakcyjnych, czy rozjazdów zgodnie z zakresem technicznym uwzględnionym w instrukcji utrzymaniowych. Analizę przeprowadzono na przykładzie odcinka linii kolejowej nr 250 o długości 64 km (dwutorowej). W ocenie efektywności zastosowano kryteria porównawcze wykorzystujące zestaw parametrów: ilościowych, jakościowych, technicznych, ekonomicznych oraz parametrów związanych z bezpieczeństwem.

Ocena efektywności wykazała, że system identyfikuje większą liczbę wad niż metoda manualna (wzrost wykrywalności o 187% w przypadku szyn i 145% w przypadku podkładów), w tym wczesne oznaki degradacji, które są trudne do uchwycenia podczas tradycyjnego obchodu. System zwiększa powtarzalność i obiektywność oceny stanu infrastruktury, redukuje czas inspekcji i ogranicza ryzyko błędów ludzkich. Automatyzacja procesu diagnostycznego z wykorzystaniem sztucznej inteligencji poprawia również bezpieczeństwo personelu poprzez ograniczenie konieczności pracy w torze oraz wpływa na redukcję kosztów utrzymania.

Analiza ekonomiczna wykazała, że efektywność nowej metody inspekcji wizyjnej jest tym wyższa im większy jest zakres techniczny systemu i długość torów kolejowych podlegających diagnostyce. Wyniki wykazały realną możliwość obniżenia kosztów utrzymania infrastruktury

przy zastosowaniu zaawansowanej diagnostyki wizyjnej i automatyzacji analizy danych na poziomie do 30%. Oszczędności te wynikają głównie z ograniczenia kosztów pracy (redukcja zadań manualnych), unikania kosztownych napraw awaryjnych dzięki wcześniejszemu wykrywaniu niezdatności oraz możliwości prowadzenia inspekcji podczas normalnego ruchu, co eliminuje koszty zamknięć torowych i specjalnych pojazdów diagnostycznych. Istotnym aspektem jest to, że zastosowanie nowego rozwiązania może obejmować wielokrotne cykle pracy w ciągu doby, także w godzinach nocnych lub na mniej dostępnych odcinkach infrastruktury. W praktyce pozwala to na zastąpienie pracy kilku zespołów toromistrzów działających równolegle lub rotacyjnie, znacząco zwiększając efektywność wykorzystania zasobów i podnosząc dokładność kontroli stanu technicznego torów. **Potwierdza to postawioną hipotezę badawczą pracy, mówiącą o przewadze systemu AI nad konwencjonalnymi metodami diagnostyki – zarówno pod względem efektywności kosztowej, jak i poziomu bezpieczeństwa pracy.** Co więcej, poprawa bezpieczeństwa niesie za sobą również korzyści organizacyjne (mniejsze ryzyko absencji chorobowych, redukcja wypadków przy pracy), co w dłuższej perspektywie może wpływać na efektywność całego systemu utrzymania infrastruktury kolejowej. We wnioskach końcowych doktorant wskazał możliwe kierunki dalszych badań naukowych i zastosowań praktycznych, szczególnie w kontekście zakresu technicznego diagnostyki, poprawy efektywności na krótkich odcinkach torów i rozszerzenia funkcjonalności o automatyczne rozróżnianie typu wad szyn.

W pracy doktorskiej wykorzystano wybrane rezultaty projektu badawczo-rozwojowego pt. „Opracowanie zintegrowanego systemu do monitorowania i utrzymania predykcyjnego infrastruktury oraz taboru kolejowego opartego na analizie danych operacyjnych i diagnostycznych”, realizowanego w ramach programu „Szybka Ścieżka 1_2020” i finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. W pracy zamieszczono odwołania do raportów okresowych i raportu końcowego z tego projektu (poz. 118 i 119 w bibliografii). W projekcie tym Doktorant był Kierownikiem B+R odpowiedzialny za planowanie, integrację działań technologicznych oraz nadzór merytoryczny nad realizacją celów projektu, oraz ekspertem ds. infrastruktury kolejowej, odpowiadający za praktyczne ukierunkowanie działań badawczo-rozwojowych i ich dostosowanie do potrzeb eksploatacyjnych. W podrozdziale 2.6.3 „Zakres autorskiego wkładu i wykorzystanie rezultatów projektu dofinansowanego przez NCBR” i 15.2.3 „Osiągnięcia autora pracy” doktorant spośród zadań wykonywanych w ramach projektu szczegółowo opisał wkład własny zarówno naukowy, jak i aplikacyjny obejmujący m.in.:

1. Opracowanie metodyki oraz ocenę komercyjnych urządzeń diagnostycznych z systemem wizyjnym,
2. Wykonanie analizy porównawczej tradycyjnej metody inspekcji torów i nowej metody wizyjnej wspieranej przez sztuczną inteligencję,

3. Opracowanie metodyki wdrożenia automatycznej oceny stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej do diagnostyki infrastruktury kolejowej,
4. Przeprowadzenie oceny wpływu ekonomicznego inspekcji nawierzchni torowej na koszty diagnostyki i efektywność,
5. Opracowanie i weryfikację eksperckiej metody obliczania wskaźników degradacji szyn i podkładów.

Jednym z kluczowych osiągnięć doktoranta było opracowanie autorskiego algorytmu do ilościowej oceny stopnia degradacji szyn i podkładów na podstawie obrazów, którego implementację i walidację Doktorant przedstawił w rozdziale 12. Przeprowadzone testy opracowanego algorytmu potwierdziły jego dokładność i zgodność z ocenami eksperckimi. Istotnym elementem badań doktoranta był również eksperyment porównawczy, w którym skuteczność inspekcji wizyjnej z wykorzystaniem sztucznej inteligencji zestawiono z wynikami tradycyjnego obchodu torów. Jest to wkład istotny, oryginalny i potwierdzający kwalifikacje badawcze Autora.

Podsumowując stwierdzam, że analizowane zagadnienia zostały wyczerpująco udokumentowane i uzasadnione wynikami badań własnych. Postawiona hipoteza pracy została udowodniona, a cel główny i cele aplikacyjne zostały zrealizowane. Praca stanowi oryginalny wkład w rozwój nowych technologii diagnostycznych infrastruktury kolejowej i ma znaczący potencjał wdrożeniowy w obszarze utrzymania nawierzchni torowej. Opracowany i zbadany system diagnostyczny do inspekcji szyn i podkładów kolejowych z wykorzystaniem wizyjnych metod opartych na sztucznej inteligencji może stanowić uzupełnienie aktualnie stosowanych metod opartych na manualnych inspekcjach toromistrzów. Rozwiązanie rekomendowane jest przede wszystkim dla podmiotów zarządzających rozległą siecią kolejową (np. PKP PLK S.A.).

4. Uwagi szczegółowe do pracy

Rozprawa jest napisana poprawnym, precyzyjnym językiem naukowym i dobrze udokumentowana źródłowo. Zawiera liczne odniesienia do literatury krajowej i zagranicznej, a także do aktów prawnych i dokumentów strategicznych Unii Europejskiej (łącznie 217 pozycji literatury). Układ pracy jest przejrzysty, a ilustracje, tabele i diagramy wspierają narrację tekstową.

Praca napisana z zastosowaniem właściwej terminologii, nie mniej jednak Doktorant nie uniknął kilku błędów językowych, edytorskich i stylistycznych np.:

1. W pracy brak wykazu skrótów i oznaczeń, których jest dość dużo w treści,
2. Str. 47 – pkt. 2.6 *Geneza problematyki badawczej* powinien być na początku rozdziału 2 *Przegląd stanu wiedzy dotyczący tematyki pracy*,
3. Str. 44 – pkt. *Proces zakupu urządzenia diagnostycznego z systemem wizyjnym* mógłby zostać pominięty bez uszczerbku dla jakości całej pracy,

4. Str. 59 – pkt. 2.6.1 *Sformułowanie problemu naukowego* i pkt. 2.6.2 *Przedmiot, cel i hipoteza badawcza pracy* w celu podkreślenia ich wagi powinny stanowić oddzielny rozdział 3 zatytułowany: 3. *Sformułowanie problemu badawczego i cele pracy*,
5. Str. 59 – jest: *Zadania realizowane w ramach Rozdziałów 1, 2, 3, 4, 14 i 15 zostały w całości opracowane przez autora pracy*, a powinno być: *Zadania realizowane w ramach Rozdziałów 1, 2, 3, 4, 12, 14 i 15 zostały w całości opracowane przez autora pracy*,
6. Str. 67 – tytuł pkt. 3.2 *Projektowanie imperatywnego algorytmu oceny stopnia degradacji szyn i podkładów* mógłby zostać skrócony do: *Algorytm oceny stopnia degradacji szyn i podkładów*,
7. Str. 67 – rys. 6. *Schemat potoku przetwarzania danych* – słaba jakość rysunku, na wydruku rysunek jest nieczytelny,
8. Str. 116 – jest: „...dzięki czemu przyspieszają...”, a powinno być: „...dzięki czemu przyspieszają...”,
9. Str. 127 – jest: „...znaczące przyspieszenie obliczeń...”, a powinno być: „...znaczące przyspieszenie obliczeń...”,
10. Str. 177 – Autor pisze: „System wizyjny powinien zapewniać poziom niezawodności na poziomie 95% – oznacza to, że urządzenie powinno być w pełni operacyjne przez co najmniej 95% czasu eksploatacji, wyłączając okresy konserwacji i przeglądów technicznych.” Poziom niezawodności to zdolność obiektu do ciągłego działania bez uszkodzeń, obejmująca poprawność działania. W tym przypadku zamiast „poziomu niezawodności”, bardziej adekwatny jest „poziom dostępności”,
11. Str. 178 – pkt. *Analiza znaczenia zmiany w kontekście wdrożenia systemu diagnostycznego* mógłby zostać pominięty bez uszczerbku dla wartości merytorycznej całej pracy,
12. Str. 220 – jest: „14. PORÓWNANIE NOWEJ METODY INESPCJKI WIZYJNEJ...” a powinno być: „14. PORÓWNANIE NOWEJ METODY INSPEKCJI WIZYJNEJ...”,
13. Str. 221 – jest: „Pojazd wyposażony w urządzenie diagnostyczne może rejestrować dane przy prędkości sięgającej nawet 120 km/h, co oznacza możliwość znacznego skrócenia czasu inspekcji terenowej”. Badania eksploatacyjne systemu były wykonane na linii na linii kolejowej nr 250, na której prędkość eksploatacyjna wynosi 70 km/h. Maksymalna prędkość wózka motorowego WM15-A to 80 km/h. Skąd więc pewność, że urządzenie diagnostyczne może poprawnie rejestrować dane przy prędkości 120 km/h?
14. Str. 281-281 – wstawiony jest dwa razy ten sam tekst: „Wyniki pracy wykazały, że zastosowanie...”,

15. Str. 256 – do obliczeń kosztu rocznego obchodu torów przyjęto 48 obchodów, a zwykle w roku jest 52 tygodnie,

16. Miejscami występują powtórzenia w opisach systemów i technologii, a niektóre tabele i wykresy mogłyby być bardziej skondensowane.

Uwagi te mają jednak charakter redakcyjny i nie wpływają na ogólną ocenę pracy.

Do części badawczej pracy nasuwa się kilka pytań, które uważam mogą być warte dyskusji podczas publicznej obrony pracy doktorskiej Pana mgra Sebastiana Kałuży:

1. Jakie są główne ograniczenia zaproponowanego w pracy systemu wizyjnej inspekcji nawierzchni torowej oraz jakie warunki muszą zostać spełnione, aby rozwiązanie to mogło zostać wykorzystane w praktyce utrzymania infrastruktury kolejowej?
2. Jaką rolę pełnią algorytmy uczenia maszynowego w zaproponowanym systemie diagnostycznym i jakie są granice ich zastosowania w kontekście bezpieczeństwa i odpowiedzialności w kolei?
3. Jaki jest wpływ drgań i zmiennych warunków eksploatacji (nierówności toru, oświetlenie, temperatura) na jakość rejestrowanych obrazów?
4. Fałszywe alarmy (false positives) mogą prowadzić do niepotrzebnych interwencji i zwiększenia kosztów utrzymania, podczas gdy przeoczenia rzeczywistych uszkodzeń (false negatives) niosą ryzyko poważnych zagrożeń dla bezpieczeństwa. Jakie metody zapobiegania fałszywym alarmom zastosowano w opracowanym systemie?
5. Do trenowania i testowania modeli sieci neuronowych (pkt. 8.1) wykorzystano kompilację danych z wielu źródeł m.in. dane z przejazdu pociągu na trasie Tirano–St. Moritz w Szwajcarii. Jakie były przesłanki do wykorzystania tego materiału?
6. Praca dotyczy systemu diagnostycznego do detekcji wad szyn i podkładów kolejowych, natomiast w rozdziale 8 przywołano wyniki odnoszące się do rozjazdów, np.: tabela 17, 22, rys. 30?
7. W pracy opisano rozwiązanie systemu diagnostycznego do detekcji wad szyn i podkładów kolejowych. A jakie nowoczesne metody diagnostyczne można proponować do monitorowania rozjazdów kolejowych?
8. W pkt. 2.3 przy identyfikacji wyzwań wdrożeniowych Doktorant słusznie zwraca uwagę na kwestie formalne – takie jak certyfikacja nowych narzędzi diagnostycznych, konieczność opracowania nowych standardów i procedur. W pracy brakuje odniesienia do wymogów Rozporządzenia (UE) 2024/1689 ustanawiające zharmonizowane przepisy dotyczące sztucznej inteligencji tzw. AI Act, mające zastosowanie do systemów opartych na AI w sektorze transportu kolejowego.
9. Integracja urządzenia z pojazdem kolejowym została przeprowadzona przy użyciu dedykowanych uchwytów montażowych, bez ingerencji w konstrukcję wózka motorowego WM-15A lub przyczepy PWM-15 wykorzystywaną podczas badań

eksploatacyjnych. Czy została sprawdzona skrajnia kinematyczna, zwłaszcza w dolnej części, w miejscu zabudowy urządzenia?

10. Jednym z problemów technicznych stwierdzonym podczas badań eksploatacyjnych była utrata sygnału GPS, szczególnie w tunelach i w pobliżu peronów. Jakie rozwiązanie alternatywne do modułu geolokalizacji (GPS) można zaproponować w przypadku badania torowiska w bardzo długich tunelach?

5. Konkluzja końcowa

Przedstawione w pkt. 4 uwagi nie umniejszają wysokiej wartości naukowej i pozytywnej oceny merytorycznej pracy. W świetle sformułowanych uwag zawartych w recenzji pracy mgra inż. Sebastiana Kałuży pt.: „Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji” stwierdzam, że niniejsza rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim określone w obowiązujących przepisach: ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jedn. Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.) oraz ustawy z dnia 21 kwietnia 2017 r. o zmianie ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2017 poz. 859).

Recenzowana praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. W części teoretycznej Doktorant dał dowód posiadania ogólnej wiedzy w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. W części badawczej dowiódł również, że posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca wnosi nowy wkład w rozwój wiedzy z zakresu nowoczesnych metod diagnostyki nawierzchni torowej i może stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.

W związku z powyższym wnoszę do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport WSB o dopuszczenie mgra inż. Sebastiana Kałuży do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Z poważaniem,