

Dr hab. inż. Andrzej Massel

Instytut Kolejnictwa

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.

„Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji”

autorstwa **mgr inż. Sebastiana Kałuży**

wykonanej na Akademii WSB

Warszawa, 02.01.2026 r.

1. Przedmiot i podstawa recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Akademii WSB.

Wraz z pismem p. Dziekan dr hab. Katarzyny Szczepańskiej-Woszczyny z dnia 5.11.2025 r. została przesłana rozprawa doktorska p. mgr inż. Sebastiana Kałuży pt „Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji” wraz z jej streszczeniem w języku polskim i angielskim. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Marek Sitarz, promotorem pomocniczym – dr inż. Paweł Buchwald.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy metod diagnostyki szyn i podkładów kolejowych. Została sporządzona w języku polskim i liczy 309 stron. Składa się ona z 15 rozdziałów: (1) Wprowadzenie, (2) Przegląd stanu wiedzy dotyczący tematyki pracy, (3) Ocena stopnia degradacji szyn i podkładów kolejowych z wykorzystaniem systemu wizyjnego, (4) Wymagania techniczne i funkcjonalne systemu wizyjnego do inspekcji nawierzchni torowej, (5) Budowa stanowiska badawczego do detekcji wad nawierzchni torowej i badania stanowiskowego, (6) Opracowanie oraz badania wstępne prototypu urządzenia diagnostycznego do detekcji wad szyn i podkładów, (7) Zastosowanie uczenia maszynowego w analizie danych wizyjnych elementów nawierzchni torowej, (8) Implementacja i weryfikacja dokładności sieci neuronowych do detekcji wad szyn i podkładów kolejowych, (9) Wzbogacenie zbioru danych wizyjnych, (10) Douczenie modeli sieci neuronowych na rozszerzonym zbiorze danych, (11) Budowa i badania finalnej wersji systemu diagnostycznego do inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej w warunkach eksploatacyjnych, (12) Wyznaczanie stopnia degradacji szyn i podkładów z wykorzystaniem danych z nowego systemu wizyjnego, (13) Badanie nawierzchni torowej z wykorzystaniem nowego systemu diagnostycznego na linii kolejowej nr 250, (14) Porównanie nowej metody inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej opartej na sztucznej inteligencji z dotychczasową metodą stosowaną w Polsce, (15) Analiza i wnioski końcowe. Na końcu pracy zamieszczono bibliografię obejmującą 217 pozycji, spis tabel, spis rysunków, spis wykresów. Ogółem rozprawa zawiera 50 tabel, 76 rysunków, 4 wykresy. Do pracy zostało dołączone streszczenie rozprawy w języku polskim i angielskim.

3. Ocena zasadności podjęcia tematu

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy diagnostyki dwóch kluczowych elementów składowych nawierzchni kolejowej, to jest szyn oraz podkładów. Należy przy tym pamiętać, że diagnostyka nawierzchni jest podstawowym elementem systemu jej utrzymania. Obejmuje ona w szczególności oględziny, badania i pomiary, a następnie - analizę, ocenę i interpretację wyników. Praktycznym efektem diagnostyki są wnioski i zalecenia eksploatacyjne oraz utrzymaniowe.

Podstawową trudnością w diagnostyce podkładów jest konieczność oceny wizualnej ich stanu. Instrukcje zarządców infrastruktury zawierają kryteria oceny stanu podkładów betonowych oraz drewnianych, umożliwiające ich zakwalifikowanie do jednej z kategorii zużycia (małe, przeciętne, duże, bardzo duże), jednak prawidłowe przeprowadzenie oceny wymaga dużego doświadczenia od wykonującego ją pracownika.

Wprowadzenie do praktyki diagnostyki nawierzchni inspekcji wizyjnej wykorzystującej techniki rozpoznawania obrazu to szansa na zobiektywizowanie diagnostyki i uniezależnienie jej wyników od indywidualnych cech człowieka a równocześnie – na ograniczenie żmudnej i pracochłonnej oceny wizualnej.

Zagadnienie będące przedmiotem rozważań zawartych w pracy jest niezwykle aktualne. Zarządcy infrastruktury kolejowej poszukują rozwiązań w zakresie automatyzacji diagnostyki torów, pozwalających na obiektywizację analizy wyników i na zmniejszenie kosztów przy równoczesnym zapewnieniu wysokiego poziomu bezpieczeństwa. Można tu wskazać doświadczenia kolei amerykańskich zrzeszonych w Association of American Railroads w zakresie ATI (Automated Track Inspection). Automatyczne inspekcje są na tych kolejach łączone z kontrolami i ocenami wizualnymi. Taka potrzeba jest widziana także w Polsce. W sierpniu 2025 roku PKP Polskie Linie Kolejowe podpisały umowę o wartości 244 mln zł. na dostawę i wdrożenie cyfrowych rozwiązań wspieranych AI w ramach projektu Automatyzacji Obchodów Toru (AOT).

4. Omówienie treści rozprawy

Rozdział 1 (1 strona) stanowi wprowadzenie w tematykę rozprawy. Autor zwraca uwagę na jej wymiar naukowy słusznie zauważając, że badania przedstawione w pracy wzbogacają dorobek naukowy w obszarze analizy danych wizualnych i uczenia maszynowego w odniesieniu do infrastruktury torowej. Z drugiej strony badania te mają wymiar praktyczny, ponieważ dostarczają realnych rozwiązań wspierających jakość utrzymania torów, poprawę bezpieczeństwa eksploatacyjnego oraz redukcję kosztów operacyjnych.

Rozdział 2 zatytułowany „Przegląd stanu wiedzy dotyczący tematyki rozprawy” jest bardzo obszerny i liczy 55 stron. W pierwszej kolejności (podrozdział 2.1, 10 stron) przedstawiono regulacje prawne a także stan wiedzy technicznej w zakresie diagnostyki infrastruktury kolejowej. Zwrócono uwagę na nowe narzędzia diagnostyczne. Z tego przeglądu wynika, że jest to obszar intensywnych przemian w zakresie techniki i organizacji diagnostyki nawierzchni torowej. Przede wszystkim zaś widoczna jest tendencja do przechodzenia od tradycyjnych obchodów torów i stosowania prostych przyrządów pomiarowych do wykorzystania złożonych systemów czujników, pojazdów diagnostycznych i algorytmów wykorzystujących mechanizmy uczenia maszynowego.

W podrozdziale 2.2 (5 stron) scharakteryzowano systemy wizyjne mające zastosowanie w diagnostyce nawierzchni torowej. Omówiono technologię kamer (liniowych i matrycowych) a także architekturę różnych systemów, zarówno systemów offline, jak i systemów online (działających w czasie quasi rzeczywistym). Zwrócono również uwagę na możliwości, jakie niesie wykorzystanie bezzałogowych statków powietrznych wyposażonych w kamery o wysokiej rozdzielczości. Istotnym wyzwaniem jest fakt, że wdrożenie systemów wizyjnych w diagnostyce torów wymaga ich powiązania z istniejącymi systemami zarządzania infrastrukturą. Przykładami takiej integracji są system DIANA stosowany przez DB Netz a także australijski program AMIP.

Podrozdział 2.3 (5 stron) dedykowany jest wykorzystaniu sztucznej inteligencji w diagnostyce nawierzchni torowej. Współcześnie dominują algorytmy głębokiego uczenia, w tym szczególnie głębokie sieci neuronowe (CNN) o różnej architekturze dopasowanej do specyfiki zadania. Zwrócono uwagę na znaczenie starannego przygotowania danych i procesu uczenia, na jakość i reprezentatywność danych. Nowoczesne systemy umożliwiają automatyzację detekcji, wykrywanie wady na podstawie obrazu i natychmiastowe powiadomienie. Co więcej, inteligentne systemy

wizyjne stają się elementem strategii utrzymania predykcyjnego, łącząc bieżącą inspekcję z prognozowaniem stanu technicznego toru.

W podrozdziale 2.4 (20 stron) Autor przeprowadził analizę porównawczą komercyjnych wdrożeń systemów wizyjnych do inspekcji nawierzchni torowej. Została opracowana metodyka tej analizy porównawczej, uwzględniająca parametry techniczne urządzeń, bezpieczeństwo i skuteczność inspekcji wizyjnej. Metodyka ta oparta została na czterech głównych kategoriach to jest: charakterystyce pomiarów i warunkach eksploatacji, funkcjonalności, instalacji i wydajności, oprogramowaniu i integracji. Każdej z tych kategorii przypisana została maksymalna liczba punktów. Wyniki analizy wskazują, że mimo wysokiej jakości podstawowych funkcji, obecne systemy nie zapewniają pełnej automatyzacji procesu.

W ramach pracy zostało przeprowadzone badanie czystości patentowej (podrozdział 2.5, 1 strona). Wykazało ono, że nie istnieją zgłoszenia ani patenty, które stanowiłyby przeszkodę w realizacji pracy i rozwoju nowego urządzenia diagnostycznego.

Podrozdział 2.6, zatytułowany „Geneza problematyki badawczej” (14 stron) wskazuje w pierwszej kolejności na główne uwarunkowania wskazujące na potrzebę wdrożenia nowych metod diagnostyki. Są nimi zatrudnienie w sektorze zarządców infrastruktury i jego struktura wiekowa, przepustowość linii kolejowych, stan infrastruktury w skali sieciowej, bezpieczeństwo personelu, a także koszty utrzymania i ich struktura. Następnie Autor przechodzi do sformułowania problemu badawczego. Dostrzega on, że rozwój technologii w obszarze systemów wizyjnych i algorytmów sztucznej inteligencji, otwiera nowe możliwości automatyzacji inspekcji torowisk. Wskazuje jednak na kilka istotnych luk badawczych, które ograniczają praktyczne zastosowanie dostępnych systemów. Są nimi:

1. Brak szczegółowego porównania dokładności tradycyjnych metod diagnostyki torów z nowymi systemami inspekcji wizyjnej.
2. Ograniczona funkcjonalność dostępnych systemów w zakresie oceny stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej
3. Brak pogłębionych analiz wpływu automatyzacji diagnostyki opartej na sztucznej inteligencji na procesy zarządzania infrastrukturą kolejową.

Jako przedmiot swojej rozprawy Autor określił opracowanie systemu diagnostycznego do inspekcji wizyjnej elementów nawierzchni torowej, który wykorzystuje technologie wizji komputerowej oraz algorytmy sztucznej inteligencji do automatycznej identyfikacji wad, a także oceny stopnia degradacji szyn i podkładów kolejowych.

W rozdziale 3 (20 stron) przedstawiona została autorska metoda oceny stopnia degradacji szyn i podkładów. Metoda została opracowana na potrzeby systemów diagnostycznych wykorzystujących technologię inspekcji wizyjnej. Zaproponowane rozwiązanie opiera się na algorytmie, który umożliwia ilościową ocenę stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej. W pierwszej kolejności omówiono dotychczasowe podejścia do oceny stopnia degradacji szyn i podkładów (podrozdział 3.1), a następnie (3.2) przedstawiono autorską koncepcję algorytmu, który wykorzystuje dane z systemu wizyjnego do obliczenia wskaźników stopnia degradacji szyn G_s i podkładów G_p .

W rozdziale 4 (11 stron) określone zostały kluczowe wymagania funkcjonalne, techniczne, konstrukcyjne oraz eksploatacyjne dla systemu wizyjnego przeznaczonego do diagnostyki nawierzchni torowej. Przyjęte założenia uwzględniają zarówno rzeczywiste potrzeby użytkowników końcowych, jak i uwarunkowania wynikające z eksploatacji w środowisku kolejowym.

Rozdział 5 (12 stron) poświęcono omówieniu budowy i sprawdzeniu działania stanowiska badawczego, które zostało zaprojektowane w celu testowania systemu wizyjnego do detekcji wad nawierzchni torowej. Celem stanowiska było umożliwienie doboru optymalnych komponentów sprzętowych (kamer, oświetlenia, systemu sterowania) oraz wstępna walidacja działania algorytmów detekcji w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych. Wykonano zarówno testy statyczne, jak i testy dynamiczne.

W rozdziale 6 (12 stron) scharakteryzowano wstępne badania eksploatacyjne, zrealizowane na bocznicie Warszawa Grochów. Prototypowy system wizyjny do detekcji wad szyn i podkładów został zainstalowany na wózku motorowym WM15-A. Badania wstępne miały na celu zweryfikowanie systemu w warunkach rzeczywistych. Oceniano między innymi rozdzielczość przestrzenną, stabilność obrazu i wpływ drgań, jakość oświetlenia i kontrastu, spójność i jakość łączenia obrazów.

W rozdziale 7 (18 stron) przedstawiono proces przygotowania systemu wykorzystującego uczenie maszynowe do analizy wizualnej stanu nawierzchni torowej. Scharakteryzowano wybór odpowiednich algorytmów oraz ich konfigurację dostosowaną do wymagań diagnostyki nawierzchni. Omówiono proces pozyskania i etykietowania danych oraz zastosowane techniki przetwarzania. W wyniku wstępnego trenowania modeli na przygotowanych danych potwierdzona została dokładność zaproponowanego podejścia, bowiem istotne wady były wykrywane przez zastosowane modele. Równocześnie jednak zidentyfikowane zostały obszary wymagające poprawy. Konieczne było zwiększenia zróżnicowania danych w celu podniesienia dokładności detekcji. Wnioski te wyznaczyły kierunek dalszych prac nad systemem, w szczególności w zakresie rozszerzenia zbioru danych oraz doskonalenia modeli.

W rozdziale 8 (16 stron) przedstawiony został proces implementacji wybranych modeli głębokich sieci neuronowych oraz weryfikacja dokładności identyfikacji wad szyn i podkładów. W rozdziale omówiono sposób przygotowania zbiorów danych wizyjnych (podrozdział 8.1), trenowanie i testowanie modeli sieci neuronowych (podrozdział 8.2), ocenę ich dokładności (podrozdział 8.3).

Rozdział 9 (12 stron) zatytułowano „Wzbogacenie zbioru danych wizyjnych”. Opisano w nim koncepcję mobilnego wózka pomiarowego. Jego głównym celem jest umożliwienie akwizycji danych w lokalizacjach niedostępnych dla pojazdów szynowych, takich jak bocznicie wyłączane lub częściowo wyłączane z użytkowania, tunele oraz odcinki infrastruktury kolejowej o ograniczonej dostępności operacyjnej. Kluczowe zagadnienia objęte badaniami dotyczyły warunków oświetlenia, uwzględnienia różnych typów podkładów i ich wad, wpływu opadów atmosferycznych, obecności w torze ciał obcych, zachwaszczenia torów, itp.

W rozdziale 10 (7 stron) zaprezentowano szczegółowe wyniki oceny jakości detekcji wad szyn i podkładów z wykorzystaniem rozszerzonego zbioru danych. Porównano także dokładność modeli sieci neuronowych przed oraz po rozszerzeniu danych wizyjnych.

Rozdział 11 (16 stron) zawiera charakterystykę finalnej wersji systemu diagnostycznego do inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej. W pierwszej kolejności przedstawione zostały wymagania techniczno-funkcjonalne, w tym wymagania związane z bezpieczeństwem a także wymagania dotyczące obsługi i warunków pracy urządzenia a także wymagania dotyczące jego niezawodności i dostępności. Następnie omówiono architekturę sprzętowo-programową systemu, sposób integracji z pojazdem kolejowym oraz wyniki testów przeprowadzonych na docelowej infrastrukturze.

W rozdziale 12 (11 stron) opisano praktyczną implementację algorytmu do oceny degradacji szyn i podkładów z wykorzystaniem danych z systemu wizyjnego. Przedstawiono przykładowe obliczenia wskaźników degradacji szyn (G_s) i podkładów (G_p) a także proces walidacji modeli z wykorzystaniem

średniego błędu bezwzględnego (MAE) w odniesieniu do ocen eksperckich. W formie tabelarycznej dokonano porównania wyników systemu i eksperta. Sformułowano również wnioski końcowe dotyczące skuteczności opracowanego rozwiązania.

W rozdziale 13 (20 stron) zaprezentowano wyniki badań eksploatacyjnych systemu diagnostycznego przeprowadzonych na linii kolejowej SKM w Trójmieście (Gdańsk Śródmieście – Rumia). Celem badań było określenie stanu technicznego szyn i podkładów oraz walidacja dokładności algorytmu oceny stopnia degradacji w trakcie czynnego ruchu kolejowego. Badania obejmowały dwukrotną inspekcję obu torów linii kolejowej nr 250, podczas której zebrano dane dla około 120 km toru. Ich przebieg został przez Autora szczegółowo opisany.

Rozdział 14, liczący aż 59 stron poświęcony jest porównaniu proponowanej przez Autora metody inspekcji wizyjnej z metodą stosowaną dotychczas na kolejach w Polsce. W pierwszej kolejności omówiono metodykę analizy porównawczej. Uwzględniono w niej kryteria dotyczące kilku grup parametrów (ilościowych, jakościowych, ekonomicznych, technicznych, bezpieczeństwa). Sama analiza porównawcza została podzielona na 6 etapów. Następnie przedstawiono wyniki w zakresie dokładności, spójności, szybkości działania i potencjalnych oszczędności. Na końcu zawarto ocenę korzyści wdrożenia i propozycje dalszego rozwoju systemu.

Podsumowaniem pracy jest rozdział 15, w którym zaprezentowano syntetyczne zestawienie wyników porównania obu podejść w kontekście głównego celu pracy oraz weryfikacji postawionej tezy badawczej. Wykonane w ramach pracy badania i analizy pozwoliły na realizację celu dysertacji, jakim było opracowanie i ocena nowego systemu diagnostycznego do inspekcji szyn i podkładów kolejowych z wykorzystaniem wizyjnych metod opartych na sztucznej inteligencji. Cel ten został zrealizowany poprzez opracowanie, budowę i testy systemu zarówno w warunkach laboratoryjnych, stanowiskowych jak i eksploatacyjnych. W podrozdziale 15.2 szczegółowo opisano realizację poszczególnych celów częściowych – poznawczych, metodycznych, aplikacyjnych.

Autor jest świadom, że badania te nie wyczerpały w pełni omawianej tematyki. Dlatego podrozdział 15.3 poświęcony jest kierunkom dalszych prac badawczych. Wskazano między innymi na potrzebę rozwijania algorytmów sztucznej inteligencji w taki sposób, aby można było zrozumieć, dlaczego i na jakiej podstawie wykrywają one konkretne wady (wyjaśnialność AI) a także o rozszerzenie funkcjonalności algorytmów o możliwość klasyfikacji typów wad. Sformułowano także istotne rekomendacje dla wdrożeń praktycznych.

5. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa ma z jednej strony charakter teoretyczny. Badania w niej przedstawione bez wątplenia wzbogacają dorobek naukowy w obszarze analizy danych wizualnych i uczenia maszynowego w odniesieniu do infrastruktury torowej. Z drugiej strony, wyraźnie widoczne jest ukierunkowanie pracy na praktyczne zastosowanie wyników badań naukowych i prac rozwojowych. Ten praktyczny wymiar pracy potwierdza fakt, że istotna część badań w niej zawartych została zrealizowana w ramach projektu badawczo-rozwojowego pod nazwą „Opracowanie zintegrowanego systemu do monitorowania i utrzymania predykcyjnego infrastruktury oraz taboru kolejowego opartego na analizie danych operacyjnych i diagnostycznych” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (w ramach programu „Szybka Ścieżka 1_2020”).

W tym kontekście pozytywnie należy ocenić precyzyjne określenie wkładu Autora i zakresu wykorzystania rezultatów projektu dofinansowanego przez NCBiR (rozdział 2.6.3). Nie ma

wątpliwości, że zasadnicze elementy rozprawy doktorskiej, w tym dotyczące metod oceny degradacji, analizy porównawczej dokładności inspekcji oraz badań wdrożeniowych, zostały opracowane przez Autora pracy.

Przystępując do opracowania rozprawy Autor przeanalizował aktualny stan wiedzy i dostępne na rynku praktyczne rozwiązania w zakresie diagnostyki nawierzchni kolejowej. Zawarta w pracy bibliografia jest bardzo obszerna i obejmuje 217 pozycji – w większości zagranicznych i krajowych artykułów naukowych, monografii a także europejskich i krajowych aktów prawnych. Oczywiście omówione przez Autora publikacje stanowią pewien wybór i nie można ich traktować jako przeglądu całości wiedzy w tym zakresie. Nie byłoby to zresztą celowe, bowiem zasadniczą część rozprawy stanowi opis wykonanych badań a także autorskich analiz.

Metody badawcze zastosowane przez Autora w rozprawie nie budzą zastrzeżeń pod względem ich prawidłowości. Zostały one zastosowane adekwatnie do rozwiązywanych przez niego zagadnień szczegółowych. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Autor biegle posługuje się nowoczesnymi narzędziami analizy takimi jak modele sieci neuronowych, umiejętnie przy tym dobierając ich konfigurację do rozwiązywania konkretnych problemów badawczych.

W mojej opinii główne osiągnięcia naukowe przedstawione przez Autora w recenzowanej rozprawie to:

- 1) Samodzielne opracowanie metodyki porównania i przeprowadzenie badań, które zestawiły efektywność manualnego obchodu torów przez toromistrza z inspekcją automatyczną z zastosowaniem nowej metody wizyjnej wspieranej przez sztuczną inteligencję
- 2) Opracowanie oryginalnej metody zastosowania systemów wizyjnych do detekcji wad oraz do automatycznej oceny stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej, w szczególności szyn i podkładów.
- 3) Opracowanie i weryfikacja eksperckiej metody obliczania wskaźników degradacji szyn (Gs) i podkładów (Gp) umożliwiających automatyczne przypisywanie wartości stanu technicznego do szyn i podkładów.

Metody wypracowane w ramach pracy mają bez wątpienia duże znaczenie praktyczne i potencjał aplikacyjny. Mogą one znaleźć zastosowanie w codziennej działalności zarządców infrastruktury kolejowej. Wdrożenie proponowanego przez Autora systemu wizyjnego powinno zobiektywizować oceny stanu torów, zapewnić ich powtarzalność a także wyeliminować błędy wynikające z wpływu czynnika ludzkiego (indywidualnych cech inspektorów – diagnostów).

6. Uwagi ogólne

Wątpliwości budzi struktura rozprawy, przede wszystkim podział treści na rozdziały. Dotyczy to w szczególności rozdziału 2, zatytułowanego „Przegląd stanu wiedzy dotyczący tematyki rozprawy”. Charakterystyka stanu wiedzy jest rzeczywiście treścią podrozdziałów 2.1, 2.2 i 2.3. Podrozdział 2.4, w którym Autor dokonał porównania komercyjnych wdrożeń systemów wizyjnych do inspekcji nawierzchni torowej, powinien być w mojej opinii wyodrębniony jako osobny rozdział. Również treść podrozdziału 2.6, w którym Autor definiuje problem badawczy i określa przedmiot, cel i hipotezę pracy, kwalifikuje się do ujęcia w osobnym rozdziale.

Z drugiej strony praca zyskałaby na przejrzystości, gdyby połączyć treści zawarte w kilku krótszych rozdziałach, w szczególności zaś rozdziałach 8, 9 oraz 10. Wszystkie one dotyczą jakości modeli sieci neuronowych stosowanych przez Autora do detekcji wad szyn oraz podkładów. Ocenie podlegają

dokładność, precyzja, czułość oraz wskaźnik F1 wyznaczone najpierw dla pierwotnego zbioru danych testowych a następnie – dla zbioru rozszerzonego.

Wadą rozprawy są przypadki użycia nieściślej, czy wręcz niepoprawnej terminologii. W szczególności Autor wielokrotnie używa określeń wziętych z języka angielskiego wplecionych w polski tekst. Przykłady podano w punkcie 7 niniejszej recenzji (Uwagi szczegółowe).

7. Uwagi szczegółowe

W szeregu miejscach rozprawy występują tak zwane teksty wiszące (na przykład fragmenty tekstu rozpoczynające rozdział 2 (na stronie 5), rozdział 3 (na stronie 61), rozdział 4 (na stronie 81), czy rozdział 5 (na stronie 92). Poprawniej byłoby ująć ich treść w osobnych podrozdziałach.

W nazwach producentów dostępnych na rynku urządzeń diagnostycznych z systemem wizyjnym (scharakteryzowanych w rozdziale 2.4) występują błędy: Belfour Beatty (powinno być Balfour Beatty), Goldsmith (powinno być Goldschmidt).

W tekście na str. 65 występuje błędne przywołanie nieistniejącej pozycji literatury [219].

W szeregu miejscach, na przykład na str. 71-72, użyte zostało określenie „frakcja” w odniesieniu do odsetka segmentów toru zawierających wady. Jest to kalka z języka angielskiego. Poprawniejsze w tym kontekście byłoby słowo „udział”.

W wielu miejscach w pracy Autor używa angielskich określeń umieszczonych bezpośrednio w polskim tekście. Na przykład w rozdziale 7 na str. 118 znajduje się angielskie określenie włączone w tekst w jęz. polskim: „Choć współcześnie zalecane jest transfer learning, w tym przypadku z niego zrezygnowano”. W rozdziale 8.1 na stronie 136 pojawia się zadanie: „Anotacje uwzględniały zarówno bounding boxes (np. dla YOLOv5), jak i maski segmentacyjne”. W przypadku braku polskiego odpowiednika danego terminu należałoby angielskie określenie wziąć w cudzysłów lub zapisać je kursywą.

Podobnie w rozdziale 8.3 na str. 144 napisano: „Wartość miar modeli została określona przez dokładność, precyzję, czułość i F1 score”. W tym przypadku poprawniej byłoby napisać „wskaźnik F1”.

W pracy wielokrotnie używane jest określenie „torowisko” w odniesieniu do toru (na przykład w rozdziale 6.5 na stronie 112 oraz w rozdziale 13 na stronach 196, 203). Należy przypomnieć, że system diagnostyczny opracowany przez Autora służy do diagnostyki elementów nawierzchni torów, nie zaś budowli ziemnych (czyli torowisk).

Na str. 204 występuje sformułowanie: „odcinek o długości około 400 metrów, na którym torowisko zamiast standardowej podsypki posiadało betonowe płyty”. Poprawnie należałoby napisać, że na odcinku zabudowana została nawierzchnia bezpodsypkowa.

Na str. 287 Autor używa nieprecyzyjnych określeń w odniesieniu do przytwierdzeń (klamry, sworznie).

W bibliografii brakuje mi przywołania bardzo istotnych w kontekście tematyki rozprawy prac H. Bałucha, przede wszystkim zaś monografii „Wspomaganie decyzji w drogach kolejowych” z 1994 roku a także pierwszej z serii prac poświęconym systemom eksperckim, nazwanych wtedy ekspertowymi, pod tytułem „Systemy ekspertowe i koncepcja ich zastosowania w problematyce nawierzchni kolejowej”, Problemy Kolejnictwa, 1990, z. 107. To właśnie w tych pracach zostały zdefiniowane kryteria kwalifikacji podkładów kolejowych, które znalazły zastosowanie w opracowanych przez H.

Bałucha systemach wspomagania decyzji UNIP (Ustalanie Nacisków i Prędkości) oraz DONG (Decyzje o Naprawach Głównych). Te same kryteria są stosowane do dzisiaj w instrukcji Id-1 PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

8. Pytania do Autora

1. W rozdziale 15.3 wskazane zostały rekomendacje dotyczące dalszych badań i wdrożeń. Słusznie zauważa Pan, że pierwszą rekomendacją we wdrożeniach jest rozszerzenie funkcjonalności systemu na pozostałe elementy nawierzchni torowej, zwłaszcza podsypkę i przytwierdzenia. Jakie badania zaproponowałby Pan w celu uwzględnienia w systemie automatycznej oceny stanu podsypki, zgodnie z kryteriami zawartymi w instrukcji Id-1?
2. Jaki tryb postępowania zaproponowałby Pan w odniesieniu do automatyzacji oceny stanu przytwierdzeń uwzględniając fakt dużego ich zróżnicowania? Na przykład na kolejach polskich występują zarówno przytwierdzenia pośrednie typu K, jak i przytwierdzenia sprężyste typu SB a także przytwierdzenia W14.

9. Wniosek końcowy

W mojej opinii przedstawiona do recenzji rozprawa p. mgr inż. Sebastiana Kałuży to praca o dużej wartości merytorycznej. Jej przedmiotem jest opracowanie systemu diagnostycznego do inspekcji wizyjnej elementów nawierzchni torowej, który wykorzystuje technologie wizji komputerowej oraz algorytmy sztucznej inteligencji do automatycznej identyfikacji wad, a także oceny stopnia degradacji szyn i podkładów kolejowych. Jest to zagadnienie naukowe o dużym znaczeniu praktycznym i wdrożeniowym. Podstawą wnioskowania są wykonane przez Autora badania przeprowadzone na stanowisku badawczym a także badania eksploatacyjne wykonane w warunkach rzeczywistych, na odcinkach linii kolejowych.

Recenzowana rozprawa doktorska p. mgr inż. Sebastiana Kałuży pod tytułem „Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji” spełnia warunki zapisane w art. 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym. Prezentuje ona ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport a także umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego a równocześnie oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań w sferze gospodarczej. Wnioskuje zatem o przyjęcie recenzowanej rozprawy i dopuszczenie do publicznej jej obrony.