

Katowice, 10.02.2025r.

Dr hab. inż. Rafał Burdzik, prof. PŚ  
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej  
Politechnika Śląska  
40-019 Katowice  
Ul. Krasińskiego 8

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr. inż. Marka Sokołowskiego**

pt.

***„Metoda utrzymania taboru metra warszawskiego przy zastosowaniu  
predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego”***

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest Uchwała nr 1066/2024 z dnia 17.12.2024 r. Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Warszawskiej.

**1. Ocena aktualności tematu rozprawy oraz poprawności sformułowanych celu i tezy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska dotyczy problematyki związanej z eksploatacją i utrzymaniem taboru kolejowego w specyficznych warunkach metra oraz predykcyjnych modeli monitorowania stanu technicznego. Łączy ona zatem kilka istotnych aktualnych problemów badawczych związanych z rozwojem systemów planowania i obsługiwanego środków transportu zbiorowego oraz zastosowania zaawansowanych metod estymacji bezpiecznego czasu użytkowania z wykorzystaniem technik informacyjnych. Dodatkowo zakłada zastosowanie rozproszonych systemów pomiarowych różnych wielkości fizycznych, jako symptomów zmian stanu technicznego podzespołów pojazdu kolejowego. Jako potwierdzenie aktualności tematu rozprawy oraz zaproponowanego podejścia należy wskazać także zastosowanie metod uczenia maszynowego. Autor odnosi swoje badania do dwóch kluczowych obszarów eksploatacji środków transportu, czyli

bezpieczeństwa i niezawodności. System utrzymania pojazdów kolejowych można rozpatrywać jako wieloaspektowy problem decyzyjny, który wymaga wszechstronnej wiedzy i właściwego podejścia do jego zaprojektowania. Koncepcja predykcyjnego systemu utrzymania w miejsce dotychczas powszechnie stosowanego i prawnie ugruntowanego systemu planowo zapobiegawczego jest zgodna z ogólnymi trendami obserwowanymi w obszarze monitorowania i diagnostyki maszyn.

Aktualnie odpowiedzialność za opracowanie wytycznych oraz planu eksploatacyjno-obługowego utrzymania pojazdów kolejowych ponosi dostawca (producent). W sytuacji, kiedy dostawca wspomaga się w produkcji montażem gotowych komponentów różnych producentów na globalnym rynku, często według grup produktowych zespołów elektrycznych, elektronicznych, pneumatycznych lub mechanicznych, każdy z tych podzespołów ma indywidualny cykl przeglądowo-naprawczy. To właśnie w zakresie obowiązków producenta jest opracowanie jednolitego planu obsługowo-naprawczego z uwzględnieniem cykli obsługowych wszystkich podzespołów. Zgodnie z aktualnymi przepisami w tym zakresie dostawca / producent odpowiedzialny jest za opracowanie Dokumentacji Systemu Utrzymania (DSU). Wynika z tego konieczność zatwierdzenia DSU wraz z Dokumentacją Techniczno-Ruchową przez uzyskiwanie świadectwa eksploatacji typu taboru przez Prezesa Urzędu Transportu Kolejowego. Zgodnie z Dyrektywą 2008/110/WE i Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 12 października 2005 r. w sprawie ogólnych warunków technicznych eksploatacji pojazdów kolejowych (Dz.U. nr 212, poz. 1771) DSU powinno jasno definiować zakres i resursy poziomów przeglądowych od P1 do P5. Dyrektywa 2008/110/WE wprowadzenia definicję "podmiotu odpowiedzialnego za utrzymanie" i ma na celu zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa oraz interoperacyjności systemów kolejowych przez odpowiednie zarządzanie procesem utrzymania pojazdów kolejowych. System utrzymania taboru kolejowego musi zatem uwzględniać wiele czynników, które mają wpływ na częstotliwość przeglądów użytkowanego taboru. Dlatego opracowanie odpowiedniego harmonogramu i zakresu czynności obsługowych ma krytyczne znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa, niezawodności i efektywności eksploatowanego taboru

kolejowego oraz determinuje jego dostępność i koszty operacyjne. **Dlatego należy jednoznacznie stwierdzić, że podjęta w rozprawie tematyka jest bardzo aktualna i wysoce użyteczna.**

Autor rozprawy podjął wyzwanie zmiany podejścia do utrzymania przez wprowadzenie systemu diagnostyki on-line. Umożliwić ma to ciągłą weryfikację stanu technicznego kluczowych podzespołów pojazdu w trakcie eksploatacji i w konsekwencji adaptacyjne przesuwanie zasobów między obsługowymi w czasie. *Problematyka eksploatacji i bezpieczeństwa środków transportu, stanowią ważną grupę zagadnień w obszarze transportu, dlatego należy uznać, że tematyka rozprawy jest zgodna z zakresem dyscypliny naukowej Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.*

Aktualna metoda utrzymania pojazdów kolejowych metra zakłada pięć poziomów utrzymania. Poziomy od 1 do 3 określają zakres czynności przeglądowo-obługowych. Poziomy 4 i 5 zakres czynności naprawczych. Podczas określania zasobów między obsługowymi oraz zakresu czynności bazuje ona na odtwarzaniu zdolności eksploatacyjnych pojazdu w procesie utrzymania. Dynamiczny rozwój elektroniki i automatyki oraz ogólny trend rozbudowy zespołów o moduły wyposażone w czujniki, szczególnie w sektorze przemysłu kolejowego, lotniczego i automotive daje nowe możliwości monitorowania stanu technicznego zespołów i podzespołów środków transportu. Autor rozprawy rozpoznając te możliwości sformułował cel główny, jako:

- *Opracowanie systemu utrzymania pojazdów kolejowych metra z zastosowaniem technologii elektronicznych i informatycznych dla transmisji danych on-line na potrzeby oceny technicznej istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji części elementów pojazdów użytkowanych przez metro.*

Dodatkowo Autor pomocnicze cele cząstkowe, wyznaczające kolejne etapy realizacji celu głównego.

Jako tezę przyjęto:

- *Stosowanie narzędzi elektronicznych i informatycznych, w tym wnioskowania statystycznego oraz transmisji on-line umożliwia opracowanie efektywnego*

*predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego, który zwiększa bezpieczeństwo i efektywność eksploatacji pojazdów oraz ich dostępność, jednocześnie automatyzując i zmniejszając nakład pracy w zakresie utrzymania.*

**Uważam, że cel i teza pracy zostały sformułowane prawidłowo i mają charakter twórczy oraz istotny aspekt użyteczny.**

## **2. Struktura i charakterystyka rozprawy**

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Marka Sokołowskiego zawiera się na 146 stronach (w druku), podzielonych na 10 rozdziałów. Ponadto zamieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wprowadzenie, spis literatury składający się z 88 pozycji (w tym 3 pozycji współautorskich), spis rysunków i tabel. Całość rozprawy, z wyłączeniem streszczenia w języku angielskim, jest napisana w języku polskim.

W rozdziale 1 przedstawiono syntetyczny przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie badanego zagadnienia oraz przybliżono aspekty prawne związane z odpowiedzialnością i zakresem systemu utrzymania pojazdów kolejowych. Autor przytacza także definicję kluczowych pojęć w dalszej lekturze rozprawy oraz graficznie ilustruje poziomy utrzymania.

W kolejnym rozdziale Autor uzasadnia i definiuje cel, tezę i zakres pracy. Dodatkowo w formie graficznej ilustruje zakres rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 3 opisano kluczowe elementy wykorzystane w opracowaniu systemu predykcji. Określono także ogólne wymagania i zasady budowy modeli predykcyjnych opartych na symulacji procesu rzeczywistego. W rozdziale tym przedstawiono także podstawowe informacje w zakresie przekształceń i metod matematycznych stosowanych w późniejszych etapach formalizacji modelu predykcyjno-decyzyjnego.

Bardziej szczegółowy opis algorytmu postępowania podczas tworzenia modeli predykcyjnych przedstawiono w rozdziale 4. Na uwagę zasługuje krytyczne podejście Autora i wskazanie wyzwań oraz ograniczeń modelowania predykcyjnego (str. 59).

W rozdziale 5 określono wymagania funkcjonalne budowy systemu utrzymania taboru kolejowego w procesie opartym na predykcji i wykorzystującym dostępne dane z czujników zamontowanych na pojeździe oraz wykorzystujący narzędzia przetwarzania sygnałów do oceny stanu elementów pojazdu.

Rozdział 6 jest najważniejszym rozdziałem w rozprawie doktorskiej. Opisano w nim zaproponowany model predykcyjny utrzymania taboru. Jako główny cel budowy modelu określono dostarczenie narzędzia wspomagającego ocenę i predykcję stanu istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji elementów pojazdu. Najważniejszym elementem modelu, jest system parametryczny oraz systemy analityczny i predykcyjny weryfikujące stan techniczny podzespołów i pozostały czas eksploatacji. Autor dokonał oceny ryzyka określonych podzespołów pojazdu w celu wyboru tych krytycznych z punktu widzenia bezpieczeństwa. Następnie dokonał parametryzacji wartości sygnałów rejestrowanych w kolejnych systemach pomiarowych dla tych zespołów pojazdu oraz określił algorytmy przetwarzania informacji i kryteria decyzyjne. Następnie określił schemat transmisji do Centrum Nadzoru Stanu Pojazdu (CNSP), z unikalnym identyfikatorem umożliwiającym jednoznaczną identyfikację na każdym etapie przetwarzania. Jako najważniejsze osiągnięcie opiniowanej rozprawy doktorskiej należy uznać zaproponowany model systemu predykcji utrzymania taboru kolejowego, sformalizowany jako uporządkowana piątka: podzespołów pojazdu, zmiennych opisujących stan, zdefiniowanych poziomów utrzymania, metod oceny i relacji wzajemnych podzespołów i zmiennych stanu. Autor nazwał swój model MOPTS - model oceny i predykcji taboru szynowego. Rozdział ten jest bogato ilustrowany i logicznie przedstawia koncepcję działania systemu od oceny pojedynczych modułów do oceny całego pojazdu, jako łącznej oceny stanu.

W rozdziale 7 opisano założenia i procedurę implementacji metody oceny i predykcji zapasu zdatności. Zdefiniowano kluczowy element systemu jako serwer analityczny, który przetwarza sygnały z serwera danych CNSP i adresuje je do poszczególnych modułów analitycznych oceniających stan podzespołu i prognozujących zapas zdatności dla tego modułu. Zastosowano w tym celu metody uczenia maszynowego, które na podstawie prawidłowych wzorców identyfikują

różnice i weryfikują warunek przekroczenia  $2\sigma$ . Kolejny algorytm bazuje na ocenie widm FFT i ocenie zgodności częstotliwościowej ze wzorcem. Do weryfikacji sygnałów z termopar i wartości prądowych zastosowano metodę komparacji.

W rozdziale 8 opisano proces weryfikację modelu i metody z wykorzystaniem rzeczywistych danych pomiarowych, które pochodzą z czujników zamontowanych na pojazdach metra (Inspiro firmy Siemens). W tym celu przeprowadzono analizę studium przypadku prowadząc wnioski w postprocessingu sygnałów z termopar i czujników przyspieszeń drgań. Celem tych analiz była ocena zgodności wyniku oceny modelem predykcyjnym ze stanem faktycznym podzespołu pojazdu.

Rozdział 9 Autor analizuje wymogi i warunki implementacji systemu w metrze warszawskim, z uwzględnieniem aspektów prawnych, technicznych, organizacyjnych i finansowych. Przedstawia także propozycję planu wdrożenia z podziałem na 5 kluczowych etapów.

Ostatni 10 rozdział to podsumowanie i wnioski. Autor sformułował wnioski ogólne dotyczące badań teoretycznych i praktycznych oraz koncepcji systemu i modelu predykcji, wytycznych implementacyjnych i wyników weryfikacji na drodze studium przypadku. Dodatkowo Autor określił kierunki dalszych badań.

Ostatni część pracy zawiera wykaz literatury w układzie alfabetycznym. Dobór i liczba publikacji stanowi reprezentatywny stan wiedzy w poruszonym obszarze badawczym.

Reasumując układ rozprawy jest logiczny i spójny, zaś struktura prawidłowa. Język rozprawy jest prosty i komunikatywny, jednak w tekście znajduje się bardzo wiele błędów, szczególnie żargonowych sformułowań i „zangielszczeń”. Nie wpływają one jednak zasadniczo na pozytywną ocenę formalną i merytoryczną rozprawy doktorskiej.

### **3. Ocena rozprawy**

**Merytoryczna ocena opiniowanej rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Marka Sokolowskiego jest pozytywna.** Podjęta tematyka jest ważna i ma charakter interdyscyplinarny oraz aplikacyjny. Pod względem rozważań teoretycznych

i zastosowań praktycznych wnosi wkład w przede wszystkim w Dyscyplinę Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport ale także w Dyscyplinę Inżynieria mechaniczna, zaś jej utylitarny charakter może znaleźć zastosowanie także w obszarach automatyki w pojazdach kolejowych i systemach zarządzania flotą.

Autor rozprawy udowodnił osiągnięcie założonego celu i potwierdził przyjętą w rozprawie tezę. Przeprowadził badania symulacyjne z wykorzystaniem autorskiego modelu predykcji. Doktorant prawidłowo zaplanował eksperymenty badawcze, na podstawie których zweryfikował opracowane konfiguracje czujników i algorytmy decyzyjne. Tym samym należy uznać, że cel rozprawy został zrealizowany.

Doktorant rozwiązał zdefiniowany problem badawczy przy wykorzystaniu odpowiednich metod naukowych. Jako szczególne osiągnięcia w rozprawie można wskazać:

- zdefiniowanie wymagań dla systemu predykcyjnego w kontekście eksploatacji pojazdów metra, w tym wymagań technicznych, prawnych oraz organizacyjnych niezbędnych do jego skutecznego wdrożenia;
- opracowanie modelu decyzyjnego dla systemu predykcyjnego i oceny zapasu zdatności podzespołów pojazdu kluczowych dla bezpieczeństwa eksploatacji;
- opracowanie algorytmu metody systemu predykcji stanu pojazdów kolejowych, bazujący na analizie danych rzeczywistych on-line;
- koncepcję systemu oceny i predykcji stanu pojazdów kolejowych metra;

W rozprawie znajduje się wiele błędów gramatycznych i językowych oraz niedociągnięć edycyjnych. Błędy te jednak nie wpływają zasadniczo na moją pozytywną ocenę opiniowanej rozprawy doktorskiej.

**Dlatego też moja ocena całości rozprawy doktorskiej jest pozytywna.**

#### **4. Uwagi i zapytania**

Staranna lektura rozprawy prowadzi do następujących uwag i pytań:

1. W treści rozprawy bardzo często używane są nieprecyzyjne lub wręcz nieprawidłowe sformułowania o charakterze żargonu lub „zangielszczeń”,

typowe przykłady to „wibracje”, „sensory”, „metody elektroniczo-informatyczne”, „głębokość demontażu urządzeń”, „dla prowadzenia podań”, „system oceniający i generujący ocenę”, „agregacja pojazdowa”, „logika przesyłania sygnałów”, „zderzenie się z dużą ilością danych”, „predykcja czynności utrzymaniowych”, „pomiar.. będą wykonywane online”.

2. W pracy występują zbędne powtórzenia fragmentów tekstu.
3. Jakość niektórych rysunków powoduje, że są one nieczytelne (np. rys. 1.1, 5.3).
4. Występują braki w opisie osi i jednostek wykresów.
5. Proszę uzasadnić konieczność powoływania zespołu interdyscyplinarnego w procesie modelowania predykcyjnego.
6. Proszę zdefiniować, jeżeli występują, różnice w pojęciu prognoza i predykcja, które w pracy występują zamiennie.
7. Proszę uzasadnić sformułowanie (str. 46): „Analizując widmo amplitudowe, można zidentyfikować częstotliwości, które są szczególnie silne. Częstotliwości te odpowiadają częstotliwościom rezonansowym systemu, które są szczególnie istotne w kontekście bezpieczeństwa i wydajności konstrukcji.”
8. Proszę o uzasadnienie założeń dotyczących obliczeń liczby cykli według rozkładu Weibulla (str. 44) oraz czy i jak zostały one wykorzystane w opracowaniu modelu predykcji.
9. Czy w zakresie analizy metod transmisji sygnałów analizowana była technologia LoRa?
10. Proszę odnieść się do zagrożeń ataków hakerskich i cyberbezpieczeństwa proponowanego systemu predykcyjno-decyzyjnego w kontekście bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej.
11. Proszę o informację jak określano funkcję trendu w modelu predykcji i czy zakładano efekt entropii systemu.
12. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób można analizować trend na podstawie widm FFT.
13. Proszę uzasadnić opis skali oceny ryzyka oraz zakres 1-5, szczególnie w kontekście braku precyzyjnego opisu ilościowego.



14. Proszę wyjaśnić niezgodności w klasyfikacji ryzyka w tabeli 6.3 w nawiązaniu do przyjętych wartości w macierzy ryzyka (tabela 6.2) – ocena 10.
15. Proszę uzasadnić oceny cząstkowe w tabeli 6.3, w kontekście bezpieczeństwa (np. porównanie wpływu – siły oddziaływania magistrali hamulca lub sprzęgu w porównaniu np. z drzwiami lub przekładnią).
16. Proszę o uzasadnienie doboru wartości granicznych parametrów kontrolnych sygnałów (max [dwa sigma] , [jedna trzecja+1/4 amplitudy]).
17. Proszę o interpretację składowej ok. 1 Hz w widmie na rys. 8.10.
18. Proszę o uzasadnienie wniosków sformułowanych w rozdziale 8.4.

Pozostałe uwagi językowe, gramatyczne i redakcyjne zaznaczyłem na otrzymanym egzemplarzu. Nie mają one jednak istotnego znaczenia dla wartości naukowej i pozytywnej oceny merytorycznej dysertacji doktorskiej.

## 5. Konkluzja

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marka Sokołowskiego ma charakter interdyscyplinarny, jednak jednoznacznie wpisuje się w Dyscyplinę Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Całość rozprawy pokazuje logiczny i prawidłowy tok postępowania, charakterystyczny do prowadzenia badań naukowych. Pozwala to na wnioskowanie o umiejętności i dojrzałości Pana mgr. inż. Marka Sokołowskiego w planowaniu i realizacji eksperymentów badawczych. **Należy zatem stwierdzić, że opiniowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie przez Doktoranta problemu naukowego i świadczy o jego wiedzy teoretycznej i praktycznej oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w Dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.** Dodatkowo należy podkreślić użyteczny charakter dysertacji, co umożliwia ekstrakcję jej rezultatów do wielu obszarów inżynierskich.

Problematyka pracy badawczej Pana mgr. inż. Marka Sokołowskiego jest aktualna, a nawet innowacyjna. Innowacyjny charakter pracy polega na integracji środowisk symulacyjnych z danymi pozyskanymi z rozproszonego systemu

pomiarowego, składającego się z wielu czujników rejestrujących różne wielkości fizyczne oraz zastosowanie podejścia predykcyjnego w systemie utrzymania pojazdów kolejowych.

Przedstawione w recenzji uwagi nie mają zasadniczego wpływu na fakt samodzielnego zrealizowania przez Autora zadania naukowo-badawczego. Do rozwiązania zagadnienia Doktorant wykazał się wiedzą techniczną i wykorzystał poprawnie dobrane metody badawcze wykazując się umiejętnością prowadzenia eksperymentu oraz skutecznie przeprowadził weryfikację opracowanych metod.

**Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Marka Sokołowskiego pt. „Metoda utrzymania taboru metra warszawskiego przy zastosowaniu predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego” spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.). Może zatem służyć jako podstawa do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. W związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie Pana mgr. inż. Marka Sokołowskiego do publicznej obrony opiniowanej rozprawy jako dzieła w zakresie Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport.**

Dodatkowo z uwagi na innowacyjny charakter badań, duże znaczenie użytkowe uzyskanych wyników oraz ich wysoki potencjał aplikacyjny składam wniosek o rozważenie wyróżnienia opiniowanej rozprawy doktorskiej.