

Lublin – 10.02.2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Marka Sokołowskiego
pt. „Metoda utrzymania taboru metra warszawskiego przy zastosowaniu
predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego”

1. Syntetyczna charakterystyka recenzowanej rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Marka Sokołowskiego pt. „*Metoda utrzymania taboru metra warszawskiego przy zastosowaniu predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego*” została napisana na 148 stronach. Składa się ze streszczenia w języku polskim i w języku angielskim, po których następuje dziesięć rozdziałów, uzupełnionych o bibliografię, spis rysunków oraz spis tabel.

Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Marianna Jacyna.

2. Ocena doboru tematu rozprawy

Proces utrzymania i prawidłowej eksploatacji infrastruktury kolejowej stanowi jeden z kluczowych elementów wpływających zarówno na poziom bezpieczeństwa sektora kolejowego, jak i możliwość jego stałego, innowacyjnego rozwoju. Jest on niezbędny dla zapewnienia bezpieczeństwa, komfortu pasażerów oraz sprawności transportu. Prawidłowe zarządzanie infrastrukturą ma ponadto wpływ na rentowność całego systemu transportowego. Odpowiednie zarządzanie pozwala na optymalizację kosztów operacyjnych, a sprawna eksploatacja infrastruktury zmniejsza ryzyko nieplanowanych przestojów, co z kolei przyczynia się do wyższej rentowności przewozów. Nie bez znaczenia jest też fakt, że nowoczesna infrastruktura kolejowa wiąże się z dużymi nakładami inwestycyjnymi. Jej odpowiednie utrzymanie pozwala zatem na przedłużenie żywotności tych inwestycji oraz zmniejszenie kosztów związanych z naprawami i wymianą elementów, które mogłyby ulec awarii. Infrastruktura kolejowa, w tym tabor kolejowy musi być stale utrzymywana



w doskonałym stanie technicznym, aby zapewnić bezpieczeństwo pasażerów. Awaria jakiegokolwiek elementu infrastruktury związanej z przewozami pasażerskimi może prowadzić do wypadków, a w konsekwencji do ofiar śmiertelnych lub poważnych obrażeń. Odpowiednie strategie utrzymania ruchu taboru kolejowego oraz związane z tym czynności serwisowe i działania zapobiegawcze są zatem niezwykle istotne pod wieloma aspektami.

Infrastruktura kolejowa stale się rozwija. Wdrażanie nowych technologii, takich jak systemy monitorowania stanu technicznego w czasie rzeczywistym, automatyzacja, czy inteligentne systemy zarządzania utrzymaniem ruchu, jest kluczowe, aby była ona bardziej wydajna i bezpieczna. Badania naukowe umożliwiają opracowanie nowych rozwiązań, które mogą znacząco poprawić jakość eksploatacji oraz zredukować koszty związane z utrzymaniem ruchu taboru kolejowego lub innych elementów tego systemów transportu. W tym kontekście szczególnie istotnym jest prowadzenie badań naukowych w zakresie rozwoju i innowacyjności infrastruktury kolejowej, tym bardziej, że coraz poważniejszym wyzwaniem staje się utrzymanie nowoczesnych, zaawansowanych technologicznie konstrukcji taboru kolejowego w kontekście wymagań zrównoważonej eksploatacji.

Opiniowana rozprawa mgra inż. Marka Sokołowskiego dotyczy problematyki utrzymania pojazdów kolejowych metra z zastosowaniem nowoczesnych narzędzi pomiarowych, analitycznych i informatycznych w celu wdrożenia predykcyjnego systemu utrzymania pojazdów kolejowych. Nowoczesne narzędzia dostępne we współczesnej technice pozwalają w czasie rzeczywistym zbierać, agregować i analizować dane, generując informacje o stanie pojazdu w każdej chwili jego eksploatacji. Umożliwia to zastosowanie dla określonych elementów pojazdu kolejowego rozwiązań predykcyjnego systemu utrzymania, gwarantującego większą skuteczność podejmowanych działań oraz znacząc korzyści ekonomiczne. Dlatego, jako cel rozprawy wskazano opracowanie systemu utrzymania pojazdów kolejowych metra z zastosowaniem technologii elektronicznych i informatycznych oraz transmisji danych on-line na potrzeby oceny technicznej istotnych dla bezpieczeństwa eksploatacji części elementów pojazdów użytkowanych przez metro. Autor zakłada, że opracowana metoda utrzymania będzie mogła być wykorzystywana we wszystkich pojazdach kolejowych, co będzie korzystne wielowymiarowo, zarówno w obszarze bezpieczeństwa, eksploatacji, jak też w obszarze ekonomicznym. W tym kontekście zagadnienia poruszone w rozprawie mgra inż. Marka Sokołowskiego wpisują się w aktualne problemy i wyzwania badawcze oraz potrzeby gospodarcze. Zagadnienia omawiane w rozprawie mają charakter zarówno teoretyczno-badawczy, jak i praktyczny, z możliwością ich wykorzystania do celów



wdrożeniowych. Można zatem stwierdzić, że rozprawa Doktoranta jest przykładem dobrze zidentyfikowanych badań stosowanych. Temat recenzowanej rozprawy doktorskiej jest ponadto aktualny i odpowiadający obecnym wyzwaniom badawczym w zakresie utrzymania ruchu taboru kolejowego. Problem badawczy podjęty przez Doktoranta jest dobrze uzasadniony, a sformułowanie tematu właściwe. Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska to praca, która stanowi wkład w rozwój nauki, ale także spełnia wszystkie wymagania metodologiczne, merytoryczne i formalne. Tematyka oraz zakres rozprawy pozwalają na jednoznaczne jej zakwalifikowanie do dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych.

3. Ogólna charakterystyka rozprawy i jej ocena merytoryczna

Rozprawa została podzielona na 10 rozdziałów zawierających rozważania teoretyczne, opracowanie metody predykcyjnego utrzymania taboru warszawskiego metra oraz jej praktyczną weryfikację. Opracowanie Doktoranta jest dobrze zorganizowane, z wyraźnym podziałem na poszczególne rozdziały, których układ jest logiczny. Praca jest napisana w sposób zrozumiały mimo, że porusza skomplikowane zagadnienia o charakterze interdyscyplinarnym.

W części teoretycznej obejmującej rozdziały 1-6, przedstawiono przesłanki podjęcia tematyki rozprawy, przeprowadzono analizę aktów normatywnych oraz badań realizowanych przez krajowe i zagraniczne ośrodki naukowe w zakresie systemów utrzymania taboru szynowego, co pozwoliło Autorowi na wskazanie wyzwania badawczego w tym obszarze. Przedstawiono problem badawczy rozprawy, tezę oraz cel główny i cele cząstkowe. Usystematyzowano zagadnienia w zakresie wiedzy dotyczącej narzędzi i metod pomiarowych oraz infrastruktury informatycznej użytecznych z punktu widzenia ich zastosowania w analizowanej strategii utrzymania ruchu. Wskazano na zasady budowy modeli bazujących na predykcji i opisano wymagania funkcjonalne budowy systemu utrzymania taboru kolejowego opartego na modelu predykcyjnym. Doktorant opracował model predykcyjny oraz podał warunki jego działania.

Rozprawa zawiera dość gruntowny przegląd innych badań prowadzonych w analizowanej tematyce na przestrzeni ostatnich lat. Autor wykazał się dobrą umiejętnością krytycznej analizy dostępnej literatury, prowadząc dyskusję na temat prac innych badaczy, mimo poruszania się w skomplikowanym obszarze synergii metrologii aplikacyjnej, diagnostyki i monitorowania, nowoczesnych strategii utrzymania ruchu, automatyki i informatyki, metod i technik sztucznej



inteligencji oraz oczywiście przedmiotowego taboru kolejowego oraz dotyczących go aktów normatywnych. Na stronie 10 Autor przedstawia tezę badawczą: *„Stosowanie narzędzi elektronicznych i informatycznych oraz transmisji on-line umożliwia opracowanie efektywnego predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego, który zwiększa bezpieczeństwo i efektywność eksploatacji pojazdów i pośrednio zmniejsza koszty utrzymania”*. Tak sformułowana teza jest jasna i precyzyjna, poprawnie definiując zakres, cel i kierunek badania. Jest też relewantna w kontekście współczesnych wyzwań eksploatacji taboru kolejowego, z założeniem uzyskania wyników, które będą użyteczne, przyczyniając się jednocześnie do dalszego rozwoju nauki i praktyki utrzymania ruchu. Tezę badawczą Autor przedstawia ponownie na str. 30 w nieco rozwiniętej formule: *„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”*. W mojej opinii ta rozbudowana wersja tezy badawczej nie jest potrzebna, tym bardziej, że wprowadza czytelnika w pewnego rodzaju zdezorientowanie. W rozprawie Autor dość często wspomina o metodach sztucznej inteligencji, jako podstawie predykcyjnego utrzymania ruchu, co jest jak najbardziej poprawne, jednak w rozszerzonej wersji tezy badawczej akcentuje wnioskowanie statystyczne. Wnioskowanie statystyczne to dziedzina klasycznej statystyki matematycznej, która służy do oceny, jaka jest korelacja, średnia, czy dwie populacje różnią się w kontekście wariancji. Natomiast AI to narzędzie predykcji na podstawie modelu. Modele AI służą do przewidywania wartości wynikowych na podstawie wejść, poza modelami nienadzorowanymi, których zadaniem jest grupowanie obiektów. Tak więc mimo, że wnioskowanie statystyczne i AI mieszczą się w tematyce analizy danych, to jednak są dość odległe w kontekście zastosowań. Być może zatem używanie określenia „zaawansowane metody analizy danych” byłoby tu bardziej właściwe.

W omawianej części rozprawy mimo poprawnej metodologii badawczej, jasności przekazu oraz staranności formalnej, Autor nie uniknął kilku nieścisłości, skrótów myślowych, czy też pewnej niekompletności:

1. Przegląd literatury w zbyt dużym stopniu dotyczy wyłącznie publikacji z obszaru transportu kolejowego z nielicznymi odniesieniami np. do badań w obszarze lotnictwa. Tymczasem interdyscyplinarny zakres tematyczny rozprawy sugeruje potrzebę krytycznej analizy stanu wiedzy w zakresie predykcyjnego utrzymania ruchu również



w innych dyscyplinach, których wyniki mogłyby być cenne dla prac badawczych Doktoranta. Brakuje też odwołań do najnowszych publikacji w renomowanych wydawnictwach, zwłaszcza dotyczących kolei dużych prędkości, w przypadku których utrzymanie ruchu jest niezwykle popularnym obszarem badawczym z racji szeregu specyficznych wyzwań. Cennym przykładem byłyby np. wyniki zakończonego w 2024 roku hiszpańskiego projektu pt. „*Badania i rozwój nowej platformy predykcyjnego utrzymania kolei opartej na zaawansowanych technologiach: Big Data, AI, IoT i DT*”. Inicjatywa ta koncentrowała się na opracowaniu platformy, która analizuje zachowanie elementów terenowych rozproszonych w infrastrukturze przy użyciu zaawansowanych technologii AI w celu inteligentnego zarządzania za pomocą informacji dostarczanych przez czujniki i narzędzia do analizy danych, optymalizując infrastrukturę i planując działania konserwacyjne.

2. W kilku miejscach prowadzonego wywodu, przedstawiając definicje pojęć, czy też opisując przywoływany system IBM (s36g2)¹, Autor nie podaje źródeł bibliograficznych.
3. W prowadzonym wywodzie dość swobodnie jest żonglowanie pojęciami z obszaru diagnostyki, analityki oraz metod i technik opartych na AI, co prowadzi do pewnych nieścisłości. Przykładowo w rozdziale 3.4, Autor klasyfikuje oddzielnie modele decyzyjne, symulacyjne oraz cyfrowego bliźniaka, który przecież jest modelem symulacyjnym.
4. Na stronie 53 (s53g17) wspomniano o predykcyjnym utrzymaniu ruchu podając angielską wersję językową tego pojęcia jako „*prognostics maintenance*”, choć ogólnie przyjętym jest posługiwanie się „*predictive maintenance*”.
5. W rozdziale 5 Autor pisze o „... *podstawie do predykcji czynności utrzymaniowych*”, co jest nieścisłością stylistyczną. Predykcyjne utrzymanie ruchu nie służy predykcji czynności, ale predykcji potencjalnych uszkodzeń. Czynności utrzymaniowe są natomiast naturalną konsekwencją pozyskanej wiedzy.

Część użyteczna rozprawy to rozdziały 7-9, w której Autor przedstawia opis opracowanego systemu predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego. Prezentuje graficznie i opisuje algorytmy działania poszczególnych procesów, dokonuje weryfikacji całego systemu

¹ S36g2 – strona 36, 2-i wiersz od góry



z wykorzystaniem danych rzeczywistych pochodzących z warszawskiego metra w zakresie działań naprawczo-obslugowych. Przedstawiony schemat postępowania jest zgodny z klasyką metodologii prowadzenia badań naukowych. Zaproponowane rozwiązania mają charakter innowacyjny, są opisane poprawnie, odpowiednio do charakteru pracy i jej zakresu, stanowiąc jednocześnie pełne potwierdzenie przedstawionej tezy badawczej. W rozdziale 9 przedstawiono ponadto wymogi w zakresie implementacji systemu w metrze warszawskim, z uwzględnieniem adekwatnych narzędzi, procedur i rekomendacji, co jest ponadto potwierdzeniem bardzo dobrego doświadczenia praktycznego Doktoranta w analizowanej tematyce.

Rozdział 10 to podsumowanie i opis kierunków dalszych badań, w zakresie zwiększenia ilości elementów pojazdu, które mogłyby podlegać systemowi predykcyjnego utrzymania ruchu. Brakuje natomiast precyzyjnie sformułowanych wniosków, które powinny być konsekwencją przedstawionych danych, gdzie każdy pojedynczy wniosek jest poparty danymi empirycznymi, eksperymentami lub analizami teoretycznymi zawartymi w pracy.

Zidentyfikowany przez Doktoranta problem badawczy jest interesujący poznawczo. Ma również duży potencjał w zakresie zastosowań użytkowych, czego potwierdzeniem jest część weryfikacyjna rozprawy. Przyjęta teza jest sformułowana poprawnie, jest też adekwatna do celu i zakresu przeprowadzonych prac badawczych. Jednoznacznie wskazuje również na aplikacyjność nowej wiedzy zdobytej przez Doktoranta w trakcie badań, w zastosowaniach praktycznych, mających istotny wpływ na stosowanie najnowszych rozwiązań w zakresie strategii utrzymania ruchu.

Merytoryczna ocena opiniowanej rozprawy doktorskiej mgra inż. Marka Sokołowskiego jest bardzo dobra. Podjęta tematyka jest niezwykle ważna w kontekście praktyki eksploatacji obiektów technicznych, jak i bezpieczeństwa transportu kolejowego, a uzyskane wyniki wnoszą wkład w dyscyplinę inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Podsumowując ogólną charakterystyka rozprawy i jej ocenę stwierdzam, że przedstawiona do oceny praca jest bardzo dobra, a jej szczególną wartością jest aplikacyjność wyników oraz interdyscyplinarny charakter. Analizując treść rozprawy, można jednak dostrzec kilka aspektów, które nie zostały obszerniej uwzględnione w analizie (są jedynie wspomniane), a które warto wyjaśnić lub podjąć w dyskusji naukowej podczas publicznej obrony:

1. W rozprawie Autor jedynie sygnałnie wspomina o cyberbezpieczeństwie proponowanego rozwiązania. Cyberbezpieczeństwo w transporcie kolejowym to kluczowe wyzwanie, ponieważ systemy kolejowe coraz bardziej polegają na cyfrowych technologiach, a tak też jest w przypadku proponowanej metody utrzymania ruchu, gdzie



- cyberataki mogą stanowić próby manipulacji czujnikami czy systemami diagnostyki. Jakie Doktorant proponuje rozwiązania lub dalsze prace badawcze w tym zakresie?
2. Predykcyjne utrzymanie ruchu pozwala na precyzyjne określenie czasu i zakresu czynności serwisowych. Umożliwia również podanie pozostałego czasu poprawnej eksploatacji do chwili całkowitego zużycia, skutkującego koniecznością wymiany konkretnego elementu pojazdu. A to z kolei jest podstawą do planowania działań w zakresie gospodarki częściami zmiennymi. Czy Doktorant uważa, że w analizowanym przypadku metra warszawskiego taki aspekt predykcyjnej strategii utrzymania ruchu może przyczynić się do dodatkowych korzyści ekonomicznych?
 3. Na rysunku 6.1 (str. 78) przedstawiono przykładową krzywą utraty potencjału użytkowego, cytując pozycję literatury [78] z 2008 roku. W aktualnej literaturze przedmiotu RUL określa czas do całkowitego wyczerpania potencjału użytkowego. Tymczasem na przedstawionym rysunku jest to $RUL +$ pewne umowne t . Co oznacza ten dodatkowy czas i w jaki sposób można go obliczyć?
 4. W rozdziale dotyczącym weryfikacji opracowanego modelu podano między innymi, że dane do analizy pochodziły z 15-sekundowego przejazdu testowego. Czy w opinii Doktoranta są to wystarczające dane dla modelu predykcyjnego? Czy nie powinny być wykorzystane dane rejestrowane podczas codziennej eksploatacji pojazdu w długim okresie czasu?
 5. W przypadku implementacji opracowanego rozwiązania, jaką Doktorant przewiduje częstotliwość próbkowania? Czy powinna ona być powiązana z historią eksploatacji analizowanego obiektu technicznego i jego dotychczasową krzywą zużycia? Czy Doktorant przewiduje inny zakres wykorzystania danych pomiarowych w przypadku klasyfikacji stanu obiektu i predykcji jego pozostałego czasu eksploatacji?

4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Pomijając drobne niedociągnięcia i usterki nie wpływające na ogólny poziom rozprawy, należy stwierdzić, że przedstawiona do oceny dysertacja jest napisana poprawnie, realizuje jasno sprecyzowane i merytorycznie poprawny cel badawczy. Praca stanowi udaną próbę rozwiązania celnie zidentyfikowanego problemu badawczego, którego wyniki są istotne dla praktyki transportu kolejowego oraz innowacyjnych strategii eksploatacji obiektów technicznych, w tym przypadku taboru warszawskiego metra. Autor poprawnie zweryfikował



postawioną tezę oraz osiągnął założony cel badawczy. Opiniowana rozprawa jest również opracowaniem o walorach poznawczych i ma charakter bardzo dobrego opracowania naukowego. Jej Autor wykazał się umiejętnością sformułowania tezy i celu badawczego oraz doboru odpowiednich metod rozwiązania zidentyfikowanych cząstkowych zadań naukowych. Doktorant udowodnił ponadto posiadanie umiejętności poprawnego analizowania wyników badań naukowych oraz ich komunikatywnego przedstawiania nie tylko w formie tabelarycznej i graficznej, ale też poprzez kompletną interpretację słowną. Wykazał ponadto słuszność postawionej tezy w kontekście aplikacyjnym oraz przeprowadził w tym celu samodzielne badania naukowe i dokonał poprawnej analizy uzyskanych wyników. Doktorant udowodnił również posiadanie wiedzy i kompetencji w stopniu niezbędnym do prowadzenia dalszych badań naukowych. Za szczególne, choć nie jedyne osiągnięcia Doktoranta uznaję przy tym:

- Praktycznie potwierdzoną zdolność do identyfikowania wyzwań badawczo-wdrożeniowych, zgodnych z potrzebami nowoczesnego transportu kolejowego.
- Umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych w interdyscyplinarnym obszarze tematycznym z wykorzystaniem różnych metod i technik.
- Innowacyjne rozwiązanie w zakresie predykcyjnego utrzymania taboru kolejowego, dostosowane do ograniczeń konstrukcji obiektu i regulacji prawnych, o skuteczności zweryfikowanej z wykorzystaniem rzeczywistych obiektów i danych pomiarowych, wraz z wytycznymi do wdrożenia w metrze warszawskim.

Można zatem jednoznacznie stwierdzić, że przedstawiona przez mgra inż. Marka Sokołowskiego rozprawa doktorska pod tytułem „*Metoda utrzymania taboru metra warszawskiego przy zastosowaniu predykcyjnego systemu utrzymania taboru kolejowego*” prezentuje wymaganą ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie „Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport” oraz dowodzi umiejętności prowadzenia interdyscyplinarnych badań naukowych. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej, co spełnia wymagania formalne określone w art. 187. Ust. 1 Ustawy z dnia 20.07.2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 poz. 1668), uzasadniające nadanie Kandydatowi stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. Wnoszę więc o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.



Biorąc ponadto pod uwagę poziom naukowy rozprawy, jej interdyscyplinarność, opracowanie innowacyjnego rozwiązania, które jak można się spodziewać zostanie zastosowane w praktyce oraz uwzględniając dążenie Doktoranta do kontynuacji prac badawczo-wdrożeniowych niezbędnych do rozwoju warszawskiego metra, wnioskuje o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Sokołowskiego.