

**Opinia o rozprawie doktorskiej mgr inż. Aleksandra Mroza  
„Auto-adaptacyjny system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych  
obiektów mostowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego”**

WPEŁYNIŁO - WBLIW

15-10-2025

12/280/2025

**1. Podstawa formalna opracowania**

Opinię opracowano na wniosek Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Wrocławskiej, przesłany w piśmie z dnia 24.06.2025r.

**2. Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa dotyczy problematyki użytkowania a w szczególności wielkości obciążeń użytkowych występujących na obiektach mostowych w Polsce. Celem rozprawy jest: Opracowanie metody identyfikacji rzeczywistego obciążenia na obiekcie mostowym na podstawie wybranych odczytów systemu monitoringu.

Doktorant podjął się rozwiązania zagadnienia odwrotnego polegającego na stworzeniu modelu obiektu, w którym dopasowuje obciążenie do rezultatów pomiarów. Takie techniki są coraz częściej stosowane w technice i stanowią ważny element komputerowych systemów eksperckich służących diagnostyce konstrukcji. Identyfikacja rzeczywistego obciążenia na podstawie odczytów skończonej liczby czujników daje możliwość przeprowadzenia analiz i oceny wielu elementów konstrukcji przy wykorzystaniu jej modelu teoretycznego. Dlatego recenzowana praca wpisuje się w aktualny nurt badawczy, a ponadto jej potencjalne wykorzystanie ma duże znaczenie praktyczne w strukturach projektowania i utrzymania infrastruktury drogowej.

W ramach pracy doktorant wykonał:

- Przegląd literatury, w temacie systemów identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych drogowych obiektów mostowych.
- Przegląd literatury dotyczący metod uczenia maszynowego mogących mieć zastosowanie w systemach identyfikacji obciążeń obiektów mostowych ze szczególnym uwzględnieniem procesów auto-adaptacyjnych.
- Sformułował propozycję ideową systemu identyfikacji parametrów obciążeń eksploatacyjnych.
- Sformułował metodykę wdrażania, weryfikacji i walidacji proponowanego systemu.
- Przeprowadził analizy dokładności oszacowań identyfikowanych obciążeń.
- Dokonał oceny stabilności proponowanego auto-adaptacyjnego systemu oraz zidentyfikował czynniki mające wpływ na jego działanie.

Praca liczy 295 strony, zawiera 92 rysunki i 53 tabele. Całość składa się z 9 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, opisem symboli i oznaczeń oraz przyjętej w pracy terminologii. Na końcu pracy zamieszczono spis literatury (126 pozycji + 8 źródeł internetowych) oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

- Pierwszy rozdział stanowi wprowadzenie. Omówiono problem wpływu obciążeń pojazdami na stan infrastruktury transportowej. Przedstawiono w nim motywację do podjęcia tematu pracy, cele naukowe oraz zakres rozprawy.

- Rozdział drugi obejmuje analizę literatury przedmiotu w zakresie systemów identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych drogowej infrastruktury transportowej. Omówiono idee identyfikacji obciążeń, systemów detekcji i identyfikacji pojazdów oraz algorytmy identyfikacji obciążeń. Przedstawiono stosowane techniki pomiarowe i zwrócono uwagę na te, które zastosowano w pracy doktorskiej.

- W rozdziale trzecim przedstawiono koncepcję systemu identyfikacji obciążeń z wykorzystaniem uczenia maszynowego. Zaprezentowano schemat budowy systemu identyfikacji obciążeń obiektów mostowych i koncepcję zbudowania systemu identyfikacji.

- Rozdział czwarty zawiera opis symulatora dynamicznej odpowiedzi konstrukcji mostowej. Szczegółowo przedstawiono rozważane modele obliczeniowe, walidację modeli obliczeniowych oraz analizę wpływu wybranych parametrów na wyniki symulacji, w tym wpływ prędkości przejazdu, tłumienia konstrukcji, masy i rozpiętości przęseł, sztywności oraz tłumienia zawieszenia pojazdu, a także nierówności nawierzchni. Opisano także generator populacji pojazdów i przedstawiono weryfikację wyników jego działania.

- Rozdział piąty zawiera opis autorskiego auto-adaptacyjnego systemu identyfikacji obciążeń obiektów mostowych pojazdami, dla którego przedstawiono założenia oraz szczegółową strukturę. Opisano zastosowaną metodykę uczenia maszynowego, analizę błędów określenia nacisku całkowitego pojazdu oraz nacisków na poszczególne osie, a także wpływ prędkości i masy pojazdu na błąd odtworzenia.

- Rozdział szósty przedstawia analizę stabilności proponowanego systemu. Omówiono wpływ różnych parametrów na działanie systemu, takich jak rozpiętość teoretyczna obiektu mostowego, masa własna obiektu mostowego, nierówności nawierzchni, liczba danych uczących, szum pomiarowy odpowiedzi konstrukcji obiektu mostowego, niepewność określenia prędkości pojazdu, niepewność określenia konfiguracji osi pojazdu, szum pomiarowy przy określaniu funkcji wpływu oraz błąd określenia funkcji wpływu. Każda z tych analiz zawiera szczegółowe informacje, wybrane efekty działania sieci oraz dokładność określenia nacisku całkowitego pojazdu.

- Rozdział siódmy zawiera podsumowanie, wnioski oraz proponowane kierunki dalszych badań.

Dodatkowe części dysertacji to:

- Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w rozprawie oraz sekcja terminologiczna – zamieszczone na początku pracy.

- Piśmiennictwo, gdzie zebrano bibliografię wykorzystaną w pracy – przedstawione po rozdziale 7.

- Streszczenie w j. polskim oraz w j. angielskim,

- Załączniki A, B oraz C, które zawierają szczegółowe informacje o implementacji poszczególnych elementów systemu.

### **Charakterystyka pracy.**

Obecnie przeżywamy w Polsce kolejny okres dużej aktywności budowlanej w obszarze infrastruktury drogowej. W ciągu ostatnich kilkunastu lat w sposób bezprecedensowy pomnożyliśmy wielokrotnie długość nowych i zmodernizowanych dróg. Wiąże się to z dużą ilością nowych obiektów inżynierskich. Istotnym czynnikiem w zarządzaniu siecią drogową są informacje dotyczące intensywności ruchu kołowego i ciężarów pojazdów poruszających się po drogach. Powstało wiele urządzeń pomiarowych, jednak za zwyczaj ich instalacja jest związana z ingerencją w strukturę jezdni. Tym samym urządzenia te ulegają szybko degradacji. Koncepcja prowadzenia pomiarów typów i ciężarów pojazdów oparta na odpowiedzi statycznej i dynamicznej przęsła małego mostu jest bardzo atrakcyjnym, alternatywnym sposobem pozyskania danych. Dodatkowo rozwijanie takiej koncepcji stwarza szereg dodatkowych możliwości związanych z utrzymaniem sieci drogowej. Zatem recenzowana praca jest bardzo aktualna i wpisuje się we współczesne potrzeby administracji drogowej. Jest przydatna również dla środowiska akademickiego oraz projektantów zajmujących się problematyką szeroko rozumianego transportu drogowego.

Całość została napisana poprawnie, układ pracy jest czytelny i logiczny. Przedstawione w pracy ilustracje, rysunki oraz tabele są opracowane czytelnie.

### **Ocena ogólna pracy.**

Praca jest ważnym przyczynkiem do wdrożenia metod opartych na sieciach neuronowych do oceny wartości i intensywności obciążeń na obiektach drogowych. Autor przeprowadził złożone studia teoretyczne mechaniki pojazdu poruszającego się po przęsle. Rozważył rozwiązania teoretyczne otrzymane na podstawie układów równań różniczkowych i rozwiązanie dyskretne MES. Przeprowadził studium obciążeń drogowych z uwzględnieniem budowy pojazdu (masa, resorowanie i tłumiki). Dodatkowo rozważał wpływ nierówności drogi i interakcję pojazdu i przęsła. Można więc stwierdzić, że część „wsadowa” pracy dotycząca zachowania się pojazdu na obiekcie została wykonana starannie. Szkoda, że zabrakło odwołania do prac prof. Wacława Szcześniaka dotyczących problematyki.

Część statystyczna pracy dotycząca generowania populacji obciążeń i uczenia maszynowego została wykonana starannie. Chociaż niektóre elementy pracy nie zostały dostatecznie szczegółowo opisane (patrz - pytania szczegółowe do pracy). Wszystkie przedstawione analizy są pod względem naukowym kompletne. Przedstawiono założenia, wyniki i analizy błędów. Na uwagę zasługuje przedstawienie rozwiązania w dwóch wariantach: quasi-statyczne i dynamiczne.

### **Uwagi lub pytania**

W pracy ograniczono się do przęsła wolnopodpartego (12 m – uznano za wystarczającą rozpiętość). Przyjęto, że na obiekcie może się znajdować jeden pojazd z analizowanej populacji. Takie założenie może paradoksalnie być zaletą, jeżeli chcemy wykorzystać mały obiekt mostowy do zbierania danych. W przypadku obiektów dłuższych (tam, gdzie mieszczą się dwa lub więcej pojazdów) sprawa się znacznie komplikuje z uwagi na wielkość zadania. Innym problemem jest bardziej złożony układ konstrukcyjny. Wtedy równania teoretyczne prawdopodobnie nie będą w stanie opisać problemu.

Można uznać, że przedstawiony model ma znaczne ograniczenia. Trzeba jednak przyznać, że praca ma charakter badawczy a nie wdrożeniowy, a opisane mankamenty są raczej natury ilościowej nie zaś jakościowej.

W pracy wykazano mały wpływ złożonego modelu obciążeń na wyniki. Zdefiniowanie masy nieresorowanej i resorowanej nie wpływa znacząco na odpowiedź mostu. Taki wniosek już dawno uzyskano w analizach dynamicznych mostów kolejowych. Tam jednak resorowanie jest znacznie sztywniejsze i nie ma na jezdni szynowej tak dużych nierówności. Dlatego w pojazdach drogowych kluczowe w ocenie są parametry resorowania (sztywność i tłumienie). Jak te wielkości określono w modelach obciążeń. Czy badano przykładowy pojazd? Czy nie należało by w ramach prac koncepcyjnych zdefiniować metodykę określania parametrów dynamicznych modeli pojazdów?

Modele obciążeń są złożone z niezależnych układów sił lub mas resorowanych. Jaki jest wpływ interakcji, gdy wszystkie sprężyny są połączone do jednego korpusu?

Istotne dla modelu są definicje rozkładu sił na poszczególne osie rozważanych pojazdów. Na rys. 4.55 pokazano rozkłady układów wieloosiowych. Czy zakresy ciężarów zastosowane do generatorów zostały ograniczone (w stosunku do przedstawionych na wykresach)?

Czy generatory uwzględniają różne wartości obciążeń na osiach? (np. wynikające z nierównomiernego rozłożenia ładunku). Jeżeli tak, to jaki rozkład zastosowano?

Określono szereg błędów:

Analiza błędu oszacowania całkowitego nacisku pojazdu

Analiza błędu oszacowania nacisków na poszczególne osie

Analiza wpływu prędkości na błąd odtworzenia

Analiza wpływu masy pojazdu na błąd odtworzenia

Czy błąd w oszacowaniu nacisków zależy od sposobu wygenerowania populacji pojazdów?

W pracy jest wzmianka o generowaniu różnych rozkładów z ograniczeniami (str.158). Jakże to były ograniczenia?

Jakie znaczenie ma określony w pracy udział poszczególnych pojazdów w wygenerowanych populacjach? Z czego wynikają dane zawarte w tab. 4.19?

## 5. Ocena końcowa pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr inż. Aleksandra Mroza pod tytułem:

„Auto-adaptacyjny system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego”

ma wartość pracy naukowej i spełnia wymagania stawiane rozprawie doktorskiej. Dotyka bardzo aktualnych problemów współczesnego projektowania i utrzymania mostów oraz wskazuje konkretne rozwiązania praktyczne.

Autor dokonał szeregu analiz z dziedziny dynamiki konstrukcji, mechaniki pojazdów. Przeprowadził prace studyjne dotyczące wpływów poszczególnych czynników związanych z poruszaniem się pojazdów po prześle na jakość odpowiedzi dynamicznej systemu. Wybrał uzasadnione naukowo uproszczenia i sformułował prototypowy system oceny obciążeń na obiekcie w oparciu o pomiar ugięć przęśla w jednym przekroju. Tym samym autor wykazał możliwości zastosowania procedur opartych na sieciach neuronowych do identyfikacji taboru drogowego na moście. Jest to oryginalne osiągnięcie naukowe mające realne perspektywy na wdrożenie w praktyce.

Praca ma zatem duże znaczenie praktyczne i jest przykładem dobrego wykorzystania nauki na potrzeby szeroko rozumianego środowiska związanego z transportem. Wprawdzie praca nie nadaje się zdaniem recenzenta wprost do zastosowania w praktyce, niemniej jednak pokazuje możliwości zaproponowanej metody i zawiera krytyczne podejście do oceny wyników. Stanowi zatem ważny krok na drodze do opracowania rozwiązań praktycznych.

Na podstawie przedłożonej rozprawy stwierdzam, iż praca doktorska Pana mgr inż. Aleksandra Mroza spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571) i może stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora.

**W związku z powyższym składam przed Wysoką Radą wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.**



Dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. uczelni