

Gliwice, 23 lipca 2025 r.

prof. dr hab. inż. Marek Salamak
Katedra Mechaniki i Mostów
Wydział Budownictwa
Politechnika Śląska
ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice

WPEŁYNIŁO - WBLIW

28-07-2025

12/231/2025

OPINIA

o pracy doktorskiej mgr inż. Aleksandra Mroza pt.:

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

1. Podstawa opracowania recenzji

Recenzja wykonana została w oparciu o uchwałę nr 183/16/RDND06/2024-2028 z dnia 11.06.2025 Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu Politechniki Wrocławskiej. Opracowana ocena dotyczy rozprawy doktorskiej mgr inż. Aleksandra Mroza o następującym tytule: *Auto-adaptacyjny system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego*.

2. Uwagi ogólne

Infrastruktura mostowa we wszystkich rozwiniętych krajach świata systematycznie się starzeje. Średni wiek obiektów mostowych w Europie Zachodniej przekracza sześćdziesiąt lat, a w Ameryce Północnej jest jeszcze wyższy. Obiekty te projektowano i realizowano z wykorzystaniem tradycyjnych materiałów – głównie betonu i stali – o parametrach mechanicznych i trwałościowych znacznie gorszych niż te, które dostępne są dzisiaj. Wiele z tamtejszych technologii miało wówczas charakter eksperymentalny lub prototypowy. Tak trzeba patrzeć na pierwsze poważne konstrukcje podwieszane czy obiekty budowane przez nasuwanie podłużne lub betonowanie nawisowe, w których zaczęto wprowadzać coraz bardziej złożone systemy sprężenia wewnętrznego, a potem i zewnętrznego.

W Polsce sytuacja wygląda nieco inaczej – dynamiczny rozwój infrastruktury drogowej i mostowej nastąpił po roku 2000. W rezultacie nasze obiekty są stosunkowo młode, a ich średni wiek wynosi około 20 lat. Programy modernizacji oraz budowy nowych tras drogowych nadal są realizowane, jednak nie ulega wątpliwości, że w perspektywie najbliższej dekady nacisk zostanie przeniesiony z inwestycji na eksploatację. Wówczas większość środków publicznych będzie przeznaczana na utrzymanie, wydłużanie okresu użytkowania oraz wymianę wyeksploatowanych konstrukcji. W praktyce oznacza to konieczność rozwoju nowoczesnych systemów gospodarowania mostami (SGM).

Jednym z podstawowych filarów takich systemów są regularne oceny rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych – realizowane nie tylko poprzez inspekcje stanu technicznego, ale także

z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi pomiarowych i analitycznych. Bieżąca, dokładna informacja o obciążeniach jest kluczowa dla racjonalnego planowania działań utrzymaniowych, określania pozostałego okresu użytkowania obiektu, a także zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników. Rzeczywiste obciążenia często odbiegają od tych przyjmowanych w projektach zgodnych ze stosowanymi normatywami, a szczególnie istotnym zagadnieniem jest identyfikacja przejazdów pojazdów przeciążonych – odpowiedzialnych za przyspieszoną degradację infrastruktury.

W tym kontekście należy docenić aktualność tematyki podjętej przez Autora rozprawy. Zaproponowany przez niego auto-adaptacyjny system identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń mostów drogowych – oparty na uczeniu maszynowym i analizie dynamicznej odpowiedzi konstrukcji – odpowiada na konkretne potrzeby praktyki inżynierskiej. Rozprawa wnosi istotny wkład poznawczy w rozwój nowoczesnych systemów identyfikacji obciążeń i wykazuje potencjał aplikacyjny w zakresie wsparcia decyzji zarządczych dotyczących oceny stanu technicznego i bezpieczeństwa mostów.

3. Treść i zakres rozprawy doktorskiej

Dysertacja poświęcona jest zagadnieniu identyfikacji rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych na drogowych obiektach mostowych, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania metod uczenia maszynowego. Głównym celem dysertacji było opracowanie auto-adaptacyjnego systemu, który – w oparciu o dynamiczną odpowiedź konstrukcji – umożliwi precyzyjne określanie nacisków osi pojazdów bez konieczności stosowania klasycznych systemów pomiarowych w nawierzchni drogowej typu WIM (Weight-in-motion).

Rozprawa łączy wiedzę z zakresu inżynierii lądowej, mechaniki konstrukcji, informatyki i sztucznej inteligencji, stanowiąc przykład interdyscyplinarnego podejścia do rozwiązywania problemów inżynierskich w obszarze diagnostyki mostów. Szczególnie cenna jest innowacyjna propozycja zastosowania uczenia nienadzorowanego w systemie SHM, co stanowi element nowości na skalę międzynarodową.

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 295 stron maszynopisu. Składa się ze spisu treści oraz siedmiu zasadniczych rozdziałów zaczynających się od wprowadzenia i kończących podsumowaniem. Dodatkowo zawiera wykaz najważniejszych oznaczeń, terminologię, piśmiennictwo, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz trzy załączniki. Praca jest bogato ilustrowana rysunkami, wykresami i zdjęciami (158 pozycji) oraz tabelami (64 pozycje). Bibliografia obejmuje 133 pozycje, w tym 7 pochodzi ze źródeł internetowych.

Praca rozpoczyna się pierwszym rozdziałem, który zawiera genezę podjęcia tematu, cele oraz zakres pracy. Autor przedstawił problematykę przeciążonych pojazdów, ich wpływ na stan techniczny infrastruktury oraz potrzebę opracowania bardziej precyzyjnych systemów identyfikacji obciążeń.

Rozdział drugi omawia istniejące rozwiązania monitorowania obciążeń drogowych i mostowych (WIM, B-WIM), metody identyfikacji pojazdów oraz algorytmy określania sił wymuszających, w tym zarówno metody quasi-statyczne, dynamiczne, jak i nowoczesne podejścia z wykorzystaniem uczenia maszynowego.

W rozdziale trzecim przedstawiono szczegółowo metodykę, architekturę sieci neuronowych, typy zastosowanych modeli (w tym autodekodery, sieci splotowe) oraz podejście do uczenia nienadzorowanego jako klucz do osiągnięcia adaptacyjności systemu.

Rozdział czwarty zawiera opis opracowanych modeli MES oraz uproszczone modele obliczeniowe, umożliwiające generowanie realistycznych danych treningowych. Zbadano tu wpływ szeregu parametrów (prędkość, masa, rozpiętość, sztywność zawieszenia, nierówności nawierzchni) na odpowiedź obiektu.

Rozdział piąty, to charakterystyka trzech wersji systemu: quasi-statycznego, dynamicznego, mieszanego. Opisano proces uczenia modeli oraz przedstawiono szczegółową analizę błędów identyfikacji całkowitego nacisku pojazdu i nacisków na poszczególne osie.

W szóstym rozdziale autor przeprowadził rozbudowane studia wpływu różnych czynników (rozpiętość przęsła, masa, szумы pomiarowe, błędy w estymacji prędkości, niepewność konfiguracji osi, liczba danych treningowych) na jakość predykcji systemu.

Końcowy rozdział siódmy zawiera syntetyczne ujęcie wyników, ocenę skuteczności opracowanego systemu, a także wskazuje kierunki dalszych badań, m.in. rozwój systemów SHM zintegrowanych z automatycznym systemem identyfikacji obciążeń oznaczonym jako AutoSIO oraz integrację z cyfrowym modelem mostu.

Całość uzupełniają: bogaty wykaz literatury (polsko- i anglojęzycznej), szczegółowy wykaz oznaczeń i terminologii, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz trzy załączniki techniczne opisujące implementację elementów składowych – autodekoderów, symulatora odpowiedzi dynamicznej konstrukcji oraz systemu AutoSIO wykorzystującego sztuczne sieci neuronowe.

4. Ocena rozprawy

4.1. Ocena merytoryczna

Podjmując w rozprawie tematykę monitorowania obciążeń eksploatacyjnych drogowych obiektów mostowych, Autor wpisuje się w jedno z kluczowych wyzwań inżynierii lądowej związanych z systematycznie starzejącą się infrastrukturą transportową. W polskich warunkach – mimo relatywnie młodego wieku sieci drogowej – problem nadmiernych obciążeń pojazdów przeciążonych, a także potrzeba zapewnienia bezpieczeństwa i wydłużenia żywotności mostów, już dziś wymaga wdrażania nowoczesnych systemów identyfikacji i monitorowania obciążeń.

Wartość poznawcza rozprawy przejawia się w kompleksowym ujęciu zagadnienia identyfikacji obciążeń z wykorzystaniem zaawansowanych technik uczenia maszynowego, a także w autorskim opracowaniu i walidacji systemu AutoSIO, cechującego się zdolnością autoadaptacji do zmiennych warunków eksploatacyjnych. Na szczególne podkreślenie zasługuje:

- precyzyjne zdefiniowanie struktury systemu oraz metodyki jego implementacji, w tym wykorzystanie sieci neuronowych do odtwarzania zarówno quasi-statycznej, jak i dynamicznej odpowiedzi obiektu mostowego,
- dogłębna analiza błędów i stabilności działania systemu, obejmująca wpływ szeregu parametrów konstrukcyjnych, eksploatacyjnych i pomiarowych,
- opracowanie własnych narzędzi programistycznych oraz symulatora dynamicznej odpowiedzi mostu z generatorem populacji pojazdów.

Możliwości aplikacyjne rozprawy są istotne zarówno dla administracji drogowej, jak i dla firm zajmujących się projektowaniem, budową i utrzymaniem mostów. Proponowane rozwiązanie mogłoby zostać wykorzystane jako element wspierający Systemy Gospodarki Mostowej (SGM),

pozwalając na aktualizację modeli obciążeń, dynamiczne zarządzanie ruchem oraz optymalizację polityki utrzymaniowej w oparciu o rzeczywiste dane o obciążeniach.

Na uznanie zasługuje również wytrwałość i konsekwencja Autora w realizacji tak złożonego tematu badawczego, obejmującego aspekty mechaniki mostów, dynamiki konstrukcji, metod numerycznych, a także zaawansowanego programowania i sztucznej inteligencji. Autor wykazuje swobodę w łączeniu różnych dziedzin wiedzy oraz biegłość w operowaniu aparatem analitycznym, potwierdzoną między innymi poprzez zaprojektowanie i implementację kompletnych narzędzi programistycznych w językach wysokiego poziomu.

Do istotnych i ciekawych wniosków, które mogą znaleźć zastosowanie w praktyce, należy zaliczyć:

- wykazanie, że klasyczne systemy B-WIM oparte na algorytmach quasi-statycznych nie pozwalają na dostatecznie precyzyjne określanie nacisków osi pojazdów, zwłaszcza w przypadku obiektów o mniejszych rozpiętościach lub bardziej skomplikowanej konstrukcji,
- potwierdzenie, że zastosowanie autorskiego systemu AutoSIO_SD pozwala na znaczące zwiększenie dokładności identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych, przy zachowaniu stabilności działania w warunkach zakłóceń i niepewności pomiarowych,
- możliwość dynamicznej adaptacji systemu do zmieniających się warunków eksploatacyjnych bez konieczności ręcznej kalibracji, co stanowi istotny atut z punktu widzenia administracji mostowej.

Wszystko to sprawia, że rozprawa stanowi wartościowy i oryginalny wkład w rozwój nowoczesnych metod identyfikacji obciążeń mostowych, z wyraźnym potencjałem wdrożeniowym i aplikacyjnym. Pod względem merytorycznym oceniam ją pozytywnie, a o jej wartości merytorycznej decydują następujące elementy:

- Właściwie dobrana tematyka rozprawy, która jest interesująca z poznawczego punktu widzenia i wymaga kompleksowego podejścia. Podjęte zagadnienie naukowe zostało powiązane z realnymi potrzebami praktyki inżynierskiej oraz administracji zarządzającej infrastrukturą mostową.
- Dobre rozeznanie stanu wiedzy w obszarze będącym przedmiotem rozprawy. Autor wykazał się kreatywnością w planowaniu i realizacji eksperymentów badawczych oraz biegłością w wykorzystaniu narzędzi programistycznych z zakresu metod uczenia maszynowego.
- Wszystkie cele pracy, sformułowane we wstępie, zostały osiągnięte, a przeprowadzone badania i analizy zostały rzetelnie podsumowane.

4.2. Uwagi krytyczne i wymagające wyjaśnienia

Uwagi krytyczne dotyczące recenzowanej rozprawy odnoszą się głównie do kwestii związanych z formalną strukturą pracy, precyzją prezentacji niektórych zagadnień oraz refleksją nad ograniczeniami proponowanego rozwiązania.

Najpierw jednak krótkie spostrzeżenie dotyczące rozpoznania tematyki preselekcyjnego ważenia pojazdów na mostach w ruchu (B-WIM). Otóż w rozprawie zabrakło krytycznego komentarza do patentu EP 3 187 838 B1 *System for vehicles weight preselection and evaluation of the technical state of road infrastructure*. Właścicielem patentu jest spółka NeoStrain

z Krakowa, a jednymi z wymienionych wynalazców są Marek Stoliński, Michał Habura, Piotr Klikowicz i Monika Zając. Chodzi o system preselekcji przeciążonych pojazdów na mostach z zastosowaniem czujników tensometrycznych i analizą odkształceń konstrukcji. Dostępna jest nawet publikacja dotycząca tego rozwiązania: Michalski Ł., Habura M., Tekieli M., Systemy preselekcyjnego ważenia pojazdów ciężarowych w ruchu, Transport Miejski i Regionalny, 12/2015, s. 9–15.

Teraz kilka refleksji i sformułowanych wraz z nimi pytań.

W punkcie 1.2 (Cele i zakres rozprawy) oraz 7.1 (Podsumowanie i wnioski) brakuje jasno sformułowanej tezy głównej rozprawy oraz precyzyjnego określenia poziomu dojrzałości opracowanego systemu (etap laboratoryjny, demonstrator, wdrożenie pilotowe).

Pytanie 1. W jakim stopniu Autor ocenia, że opracowany system AutoSIO spełnia wymagania praktyczne stawiane przez administrację mostową? Czy możliwe byłoby już dziś jego wdrożenie w środowisku rzeczywistym, czy wymaga ono dalszych badań i prac rozwojowych?

W podsumowaniu rozdziału drugiego (punkt 2.6) nie znalazło się odniesienie do kosztów implementacji różnych systemów (WIM, B-WIM, AutoSIO). W praktyce jest to istotny czynnik decydujący o wdrożeniu technologii.

Pytanie 2. Czy Autor przeprowadził lub planuje przeprowadzić analizę kosztów wdrożenia i eksploatacji opracowanego systemu AutoSIO w porównaniu z istniejącymi rozwiązaniami B-WIM lub WIM?

W podpunkcie 4.3.7 (Walidacja modeli obliczeniowych) brakuje szczegółowego opisu danych referencyjnych wykorzystanych do walidacji modeli MES. Nie podano, czy dane te pochodziły z pomiarów terenowych czy były to dane syntetyczne.

Pytanie 3. Jakiego rodzaju dane posłużyły Autorowi do walidacji modeli MES? Czy zostały one pozyskane na rzeczywistych obiektach mostowych, czy w całości były generowane numerycznie?

Punkt 5.5 (Podsumowanie i ogólna ocena opracowanych systemów) wykazuje pewne braki w zakresie omówienia wpływu błędów systemu identyfikacji obciążeń na dalsze decyzje inżynierskie, np. oceny stanu technicznego czy decyzje utrzymaniowe. W praktyce istotna jest przecież nie sama dokładność systemu, ale jej wpływ na decyzje o bezpieczeństwie obiektu.

Pytanie 4. Jakie są graniczne wartości błędów identyfikacji obciążeń, przy których opracowany system może być jeszcze uznany za przydatny w praktyce inżynierskiej? Czy Autor rozważał w swoich analizach takie kryterium techniczno-użytkowe?

W rozdziale 6 (Analiza stabilności systemu AutoSIO_SD) Autor przeprowadził szeroką analizę wpływu wybranych parametrów, jednak w analizie brak jest odniesienia do ich rzeczywistych wartości występujących w praktyce. Nie wiadomo więc, czy zakres analizowanych wariantów odpowiada realnym warunkom.

Pytanie 5. Czy przyjęte zakresy w analizach stabilności rzeczywiście odpowiadają typowym obiektom mostowym np. w Polsce? Wątpliwości może budzić przyjęcie do analizy przęsła o rozpiętość jednego metra.

4.3. Uwagi szczegółowe i edycyjne

Praca została napisana w zasadzie poprawnie. Tytuł rozprawy odzwierciedla jej treść, a układ pracy jest logiczny. Struktura podziału treści oraz zakres poszczególnych części zostały prawidłowo zaplanowane. Poniżej zestawione zostały dostrzeżenia wątpliwości.

W podrozdziale 3.1.5 (Autodekodery) oraz w Załączniku A opisano architekturę i działanie autodekoderów stosowanych w sieciach neuronowych. Brakuje tam wyraźnego rozróżnienia pomiędzy autodekoderami stosowymi, odszumiającymi oraz klasycznymi, co mogłoby być przydatne dla czytelnika mniej zaawansowanego w tematyce AI.

W rozdziale 7.1 (Podsumowanie i wnioski) występują sformułowania typu: „System AutoSIO może być z powodzeniem zastosowany...”, bez podania konkretnych warunków granicznych jego stosowalności. Wnioski końcowe mogłyby zostać sformułowane bardziej precyzyjnie, z uwzględnieniem ograniczeń opisanych w rozdziałach 5 i 6.

W rozprawie występuje kilkanaście drobnych błędów edytorskich. Należą do nich brakujące spacje po przecinkach i kropkach, szczególnie w opisach wzorów, literówki i pominięcia liter w wyrazach, brak konsekwencji w stosowaniu spacji pomiędzy liczbą a znakiem procentu, kontrowersje stylistyczne przy sposobie pisania w zdaniach liczebników z przedziału od jeden do dziesięć albo edycyjne przy stosowaniu dużej litery po dwukropku, sporadyczne powtórzenia wyrazów lub rozpoczynanie zdania z małej litery oraz stosowanie kropki zamiast przecinka do oddzielania w liczbach części dziesiętnej od całkowitej.

Pomijając drobne mankamenty, praca jest starannie zredagowana. Zawiera bogaty materiał ilustracyjny – liczne rysunki, zdjęcia i tabele. Terminologia pracy jest zasadniczo poprawna, a sprawność językowa może zostać oceniona jako dobra. Pewnym mankamentem są liczne błędy interpunkcyjne (co najmniej 72 przypadki), literowe i gramatyczne (4 przypadki), stylistyczne (18 przypadków) oraz edycyjne (20 przypadków).

Oczywiste jest jednak, że te drobne usterki nie mają istotnego wpływu na ogólną, merytoryczną ocenę pracy. Zostały one przekazane Autorowi w formie elektronicznego dokumentu, natomiast tutaj podtrzymuję ogólnie pozytywną ocenę rozprawy.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi podsumowanie przemyśleń i analiz Autora dotyczących wsparcia inżynierów w procesie identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych, z wykorzystaniem auto-adaptacyjnych systemów opartych na uczeniu maszynowym oraz integracji tych rozwiązań z praktyką administracji mostowej.

Doktorant jasno sformułował cele naukowe i je zrealizował. Za szczególnie cenne uważam opracowanie własnego, wielowariantowego systemu AutoSIO, umożliwiającego identyfikację nacisków osi pojazdów na podstawie dynamicznej odpowiedzi konstrukcji mostowej, z uwzględnieniem mechanizmów auto-adaptacji do zmieniających się warunków eksploatacyjnych. Na uwagę zasługuje także szczegółowa analiza błędów i stabilności działania systemu oraz zaprojektowanie autorskich narzędzi programistycznych służących do symulacji dynamicznej odpowiedzi konstrukcji.

Twórczy wkład Doktoranta w rozwiązanie złożonego i istotnego problemu naukowego jest interesujący i zawiera elementy nowości oraz oryginalności. Pragnę podkreślić, że

przedstawione w pracy propozycje otwierają nowe obszary badań i dają możliwość kontynuowania rozważań nad rozwijającymi się zagadnieniami — zarówno w obszarze technologii B-WIM, jak i w zakresie integracji systemów identyfikacji obciążeń z nowoczesnymi narzędziami zarządzania infrastrukturą mostową.

Biorąc pod uwagę ocenę rozprawy doktorskiej, stwierdzam, że stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie naukowej, jaką jest inżynieria lądowa, geodezja i transport. Praca potwierdza również umiejętność prowadzenia badań naukowych, a tym samym spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

W związku z powyższym wnioskuję o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ponieważ recenzowana rozprawa doktorska charakteryzuje się wysokim poziomem merytorycznym, co wynika z dogłębnego zrozumienia złożonego problemu identyfikacji eksploatacyjnych obciążeń drogowych obiektów mostowych oraz umiejętnego połączenia wiedzy z zakresu inżynierii lądowej, dynamiki konstrukcji, metod numerycznych i technik uczenia maszynowego. Nie można jej też odmówić oryginalności, która przejawia się w opracowaniu własnych narzędzi analitycznych oraz implementacji autorskiego auto-adaptacyjnego systemu identyfikacji obciążeń AutoSIO, zdolnego do działania w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Opracowany system został szczegółowo przetestowany i zweryfikowany w warunkach symulacyjnych, z uwzględnieniem różnych wariantów konstrukcji mostowych i populacji pojazdów, co otwiera nowe kierunki badań oraz ma istotny potencjał aplikacyjny w praktyce administracji mostowej. Co więcej, wyniki tej pracy mają znaczenie nie tylko poznawcze, ale i wdrożeniowe, przyczyniając się do rozwoju nowoczesnych narzędzi wspierających procesy utrzymania i monitorowania stanu technicznego mostów. To wszystko sprawia, że dodatkowo zdecydowałem się wnioskować o wyróżnienie pracy doktorskiej pana mgr inż. Aleksandra Mroza.



prof. dr hab. inż. Marek Salamak