Recenzja spełnia wymogi formalne

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. uczelni
Politechnika Gdańska
Katedra Konstrukcji Inżynierskich

Gdańsk, 6.10.2026 r.

OPINIA

o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Dawida Piotrowskiego

„Implementacja algorytmów optymalizacyjnych i technik sztucznej inteligencji w procesie tworzenia cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych"

1. Podstawa formalna opracowania

Opinię opracowano na wniosek Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej w Gliwicach z dnia 9.07.2026 r.

2. Charakterystyka rozprawy

Rozprawa dotyczy diagnostyki konstrukcji mostowych, a w szczególności opracowania procedury identyfikacji rzeczywistych obciążeń na konkretnym moście, złożonym z jezdni o konstrukcji płytowo-rusztowej podwieszonej do stalowego łuku typu network.

Głównym celem recenzowanej rozprawy było zdefiniowanie oryginalnego algorytmu optymalizacji prowadzącego do kalibracji elementów modelu MES pod obciążeniem rzeczywistymi pojazdami oraz opracowanie i wdrożenie modelu opartego na sieciach neuronowych do identyfikacji rzeczywistych obciążeń na podstawie odczytów z wybranych czujników systemu monitoringu mostu. Jest to zatem przykład klasycznej analizy odwrotnej, w której zamiast elementów modelu MES lub innej klasycznej metody analitycznej do przetwarzania wyników wykorzystano wytrenowaną sieć neuronową. W tym kontekście, nie umniejszając znaczenia i jakości pracy, należy uznać, że tytuł rozprawy jest zbyt ogólny i sugeruje znacznie szerszy zakres prac i analiz niż ten, którego praca rzeczywiście dotyczy.

Biorąc pod uwagę potrzeby środowiska związane z monitorowaniem sieci drogowej, wprowadzenie spójnego systemu identyfikacji obciążeń (pojazdów) na drogach z wykorzystaniem konstrukcji mostowej jest rozwiązaniem pożądanym. Pozwala ono na ocenę masy pojazdów, a tym samym na kontrolę ruchu na drogach publicznych. Stanowi ponadto źródło unikalnych informacji związanych z profilowaniem rzeczywistych obciążeń na drogach i mostach. Umożliwia prowadzenie diagnostyki i ocenę trwałości konstrukcji lub jej wrażliwych elementów, a także krytyczną ocenę normowych modeli obciążeń i ich modyfikację.

Wpłynęło dnia 13.10.2026 r.

Doktorant sformułował tezę i wyznaczył cele szczegółowe swoich badań. Teza pracy brzmi następująco:

> *„Zastosowanie zwalidowanej metodyki budowy cyfrowego bliźniaka integrującej dane pomiarowe, modele numeryczne i algorytmy uczenia maszynowego umożliwia identyfikację rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych na podstawie danych rejestrowanych przez system monitoringu".*

Cele szczegółowe sformułowano następująco:

1) Zbadanie możliwości wykorzystania odpowiedzi konstrukcji do identyfikacji lokalizacji punktów pomiarowych, zapewniających maksymalną ilość informacji przy jednoczesnej minimalizacji liczby czujników. Na podstawie przeprowadzonych analiz statycznych zostaną określone poziomy wrażliwości poszczególnych elementów konstrukcyjnych na wpływ obciążeń eksploatacyjnych.
2) Przeprowadzenie badań eksperymentalnych, podczas których zostaną zarejestrowane rzeczywiste dane z systemu pomiarowego. W ramach realizacji celu przeanalizowane będą różne scenariusze obciążeń, pozwalające zdefiniować zależności pomiędzy parametrami ruchu a odpowiedzią konstrukcji.
3) Ocena możliwości wykorzystania zidentyfikowanego modelu MES jako podstawy cyfrowego odwzorowania rzeczywistego obiektu. Przeprowadzona zostanie analiza wykorzystania skalibrowanych parametrów materiałowych do otrzymywania rzeczywistej odpowiedzi konstrukcji w modelu numerycznym.
4) Zbadanie możliwości wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego do identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych na podstawie danych wygenerowanych z modelu MES cyfrowego bliźniaka. Oceniona będzie reprezentatywność syntetycznego zbioru treningowego oraz skuteczność wdrożonego rozwiązania w warunkach rzeczywistego ruchu.

Na potrzeby realizacji pracy doktorskiej wykonano:

- projekt i instalację systemu SHM mostu M-7L w Wolinie,
- badania przęsła mostu w Wolinie podczas próbnego obciążenia,
- identyfikację modelu MES przęsła (por. uwagi w p. 3.4),
- opracowanie i wdrożenie procedury predykcji masy pojazdu znajdującego się na moście,
- podsumowanie prac i sformułowanie wniosków ogólnych.

Praca liczy 185 stron, zawiera 73 rysunki i 27 tabel. Składa się z 6 rozdziałów poprzedzonych spisem treści, wykazem symboli i oznaczeń oraz objaśnieniem przyjętej terminologii. Zamieszczono spis literatury obejmujący 156 pozycji oraz 14 norm i dokumentów.

3. Zwięzły opis pracy

3.1. Wprowadzenie

Autor przedstawia koncepcję cyfrowego bliźniaka jako dwukierunkowego powiązania obiektu rzeczywistego z jego modelem wirtualnym. Tezą pracy jest twierdzenie, że metodyka integrująca dane pomiarowe, model MES i uczenie maszynowe pozwala zidentyfikować rzeczywiste obciążenia eksploatacyjne mostu. W celu udowodnienia tezy Doktorant sformułował i zrealizował cztery cele szczegółowe, opisane w kolejnych rozdziałach pracy.

3.2. System monitoringu SHM mostu M-7L w Wolinie

Rozdział otwiera przegląd technik pomiarowych SHM, w tym czujników światłowodowych. Następnie opisano nowy most łukowy w Wolinie i jego model MES. Analiza statyczna i linie wpływu wykazały, że poprzecznice rusztu jezdni pracują lokalnie (zasięg linii wpływu ok. 36 m), a wieszaki i belki policzkowe – globalnie. Uznano zatem, że poprzecznica może być elementem przydatnym do rozwiązania problemu ważenia pojedynczego pojazdu. Na tej podstawie wyznaczono trzy niezależne „bramki pomiarowe" w 1/4, 1/2 i 3/4 rozpiętości. System obejmuje 17 punktów pomiaru odkształceń z czujnikami FBG (światłowodowymi siatkami Bragga) z kompensacją temperaturową, a także pomiar rozwarcia dylatacji oraz przesuwu i obrotu łożyska. Rozdział kończy się oszacowaniem niepewności pomiarów.

> **Komentarz.** W tej części pracy zabrakło opisu udziału Doktoranta w opracowaniu i tworzeniu systemu. Rzeczą naturalną i zrozumiałą jest, że tego typu instalacja to działania zespołowe, obejmujące prace teoretyczne z zakresu analizy konstrukcji i technik pomiarowych oraz prace techniczne związane z opracowaniem oprogramowania sterującego i doborem podzespołów. W tym kontekście cenna byłaby informacja o wkładzie Doktoranta w tę część pracy.

3.3. Badania pod próbnym obciążeniem

Próbne obciążenie jest standardową procedurą na etapie odbioru i przekazania konstrukcji do użytkowania. Stało się ono okazją do wykonania szeregu testów związanych ze sprawdzeniem w praktyce zainstalowanego systemu monitoringu. W testach wykorzystano dziewięć ciężarówek o masie od 27,8 do 41,5 t. Badania statyczne objęły pięć schematów: trzy nad bramkami pomiarowymi i dwa niesymetryczne. Badania dynamiczne objęły przejazdy pojedyncze z różnymi prędkościami, przejazdy w kolumnach i przejazdy losowe. Wyniki potwierdziły teoretyczne linie wpływu, lokalną pracę poprzecznic i globalną pracę wieszaków. Tym samym potwierdzono w praktyce koncepcję rozmieszczenia czujników do analizy mas przejeżdżających pojazdów.

> **Komentarz.** W tej części pracy również zabrakło opisu udziału Doktoranta w opracowaniu i prowadzeniu badań.

3.4. Identyfikacja modelu numerycznego MES

Podstawą wykorzystania modeli MES jako elementów systemów SHM jest ich walidacja. Polega ona głównie na porównaniu wyników teoretycznych i pomierzonych oraz na modyfikacji modelu MES tak, aby uzyskać technicznie wystarczającą zgodność. W praktyce proces walidacji polega najczęściej na dopasowaniu modelu do pomierzonych wartości ogólnie rozumianych przemieszczeń (statyka) i drgań (dynamika). Takie podejście pozwala na wyodrębnienie w modelu rozkładów mas i sztywności. Obecnie proces dostosowania modelu MES do rzeczywistości przebiega najczęściej z wykorzystaniem optymalizacji wielokryterialnej.

W recenzowanej pracy Autor dokonał prostej kalibracji układu na podstawie zgodności odkształceń wybranego fragmentu modelu MES i rzeczywistej konstrukcji. Określenie tej części pracy mianem identyfikacji modelu MES jest w tym wypadku nieuprawnione. Kalibrację modelu Autor zdefiniował jako zadanie optymalizacyjne z 19 zmiennymi decyzyjnymi, którymi są moduły sprężystości elementów, posługując się jednym kryterium (jedną funkcją celu). Takie podejście do problemu jest akceptowalne, jednak trzeba zwrócić uwagę, że kryterium (wzór 4-11) oparte na sumie błędów względnych może prowadzić do błędnych wyników, szczególnie tam, gdzie wartości pomierzone są małe. Same w sobie nie mają one znaczenia, ale błąd względny przy porównaniu z teorią może sięgać nawet kilkudziesięciu procent. Czy w procesie optymalizacji nie należało zastosować kilku funkcji celu i przedstawić rozwiązania w postaci frontu Pareto?

Do rozwiązania zadania użyto algorytmu genetycznego, w którym obliczenia MES zestawiono z modelem zastępczym w postaci sieci neuronowej. Przeprowadzono analizy wrażliwości zmiennych i parametrów algorytmu. Model zastępczy dał wyniki porównywalne lub lepsze niż MES przy znacznie mniejszym koszcie obliczeń. Przy okazji prowadzonych analiz Autor porównał efekty zastosowania trzech najczęściej stosowanych funkcji aktywacji przy zmiennej liczbie warstw ukrytych i liczbie neuronów w warstwach. Przeprowadził też szereg testów dotyczących wpływu rozmiaru zbioru treningowego na dokładność procedury.

Istotna i cenna dla jakości wyników pracy jest analiza wrażliwości końcowych rezultatów na parametry algorytmu genetycznego.

> **Pytanie.** W procedurze wykorzystującej algorytm genetyczny prowadzono badania dotyczące liczby osobników w selekcji turniejowej i wskaźnika mutacji. Selekcja turniejowa określa poziom eliminacji osobników „słabych", natomiast mutacja wprowadza na ogół zaburzenie o przeciwnym działaniu. Doktorant takiego trendu nie zaobserwował. Pomimo technicznie wystarczającej dokładności obliczeń można zapytać, czy nie należałoby sprawdzić działania algorytmu przy niższym wskaźniku mutacji, poniżej 10%, przy zmiennej selekcji turniejowej?

Uwaga semantyczna. Zdaniem recenzenta model MES może być aktualizowany, kalibrowany, walidowany itp. Natomiast identyfikacja to rozpoznanie czegoś, co istnieje. Właściwe byłoby więc mówienie o identyfikacji parametrów modelu MES.

W tym kontekście niezrozumiała dla recenzenta jest idea rozdzielenia poprzecznicy na niezależną część stalową i leżącą na niej płytę żelbetową. W tym wypadku Doktorant zastosował prostą kalibrację, polegającą na określeniu mnożnika zapewniającego zgodność odkształceń obliczonych i pomierzonych.

Pytania. Czy Doktorant uwzględnił w modelu MES poprzecznicy szerokość współpracującą płyty jezdni? Istotą zastrzeżenia jest fakt, że ta zastępcza szerokość, stosowana w modelu belkowym, zależy od typu i położenia obciążenia, a więc jest w tym przypadku zmienna.

Czy następstwem wprowadzonego uproszczenia mogły być tak znaczne różnice w kalibrowanym module E dla pasm płytowych E6 i E7 (rys. 4.15 i 4.16)?

Czy problem nie leży w nieprawidłowo sformułowanym modelu MES?

Fakt ten nie powinien mieć wpływu na działanie algorytmu sieci neuronowej, może jednak wpływać na jakość zbioru treningowego.

3.5. Predykcja masy całkowitej pojazdów z wykorzystaniem uczenia maszynowego

Rozdział otwiera przegląd systemów WIM (ważenia pojazdów w ruchu) i Bridge-WIM wraz ze wskazaniem luki badawczej.

Zidentyfikowany model MES posłużył do wygenerowania syntetycznego zbioru treningowego. Sygnał jest filtrowany filtrem Butterwortha i przetwarzany średnią kroczącą. Architekturę sieci dobrano za pomocą algorytmu roju cząstek (PSO) dla trzech bramek pomiarowych. Każda bramka ma osobny model, a wynik końcowy jest średnią z trzech predykcji. Schemat działania algorytmu przedstawiono na rys. 5.1.

Uwaga. Przedstawiony na rys. 5.1 schemat jest formalnie nieprawidłowy – miejsca wejścia do sieci neuronowej (dolna część rysunku) są błędne. Recenzent ma nadzieję graniczącą z pewnością, że błąd ten jest rezultatem uproszczeń graficznych. Mimo to nie powinien mieć miejsca.

Cała procedura wymagała pozyskania sygnału pomiarowego, następnie jego przetworzenia tak, aby wyeliminować efekty dynamiczne i inne lokalne ekstrema (filtrowanie), i w końcu przekazania wyniku do algorytmu sieci neuronowej. Na uwagę zasługuje procedura identyfikacji pomiarów „zerowych", czyli wykonanych bez obciążenia pojazdem. Dzięki niej system eliminuje problem odkształceń termicznych (bardzo istotnych, szczególnie w konstrukcjach stalowych). W dalszym kroku obrobione wyniki pomiarów były przekazywane do modułu analitycznego opartego na sieci neuronowej.

Osobnym problemem badawczym przy realizacji celów pracy było określenie architektury sieci neuronowej. Doktorant, korzystając z dorobku innych badaczy, przyjął architekturę sieci regresyjnej i w celu określenia jej parametrów sformułował własne zadanie optymalizacji. Zmiennymi w tym zadaniu były: liczba warstw, liczba neuronów w pierwszej warstwie, współczynnik redukcji sieci, współczynnik uczenia oraz funkcja aktywacji. Jest to zatem problem optymalizacji wieloparametrowej. Do jego rozwiązania Doktorant wykorzystał metaheurystyczny algorytm oparty na idei roju cząstek.

Rezultaty optymalizacji przedstawiono w tabelach 5.1 i 5.2. Niestety Autor nie opisał efektów optymalizacji.

> **Pytania.** Jaką strukturę sieci przyjęto w ostatecznej wersji algorytmu?
>
> Czy poszczególnym bramkom pomiarowym przyporządkowano różne architektury sieci?

W dalszej części rozdziału Autor opisał wyniki predykcji masy całkowitej pojazdów rzeczywistych. Przeprowadzono szereg testów polegających na przejazdach pojedynczych samochodów o zróżnicowanej (znanej) masie i liczbie osi. Testy te potwierdziły pełną skuteczność opracowanej metody. Wyniki zestawiono w tabelach i oceniono ich jakość za pomocą analizy statystycznej. Maksymalne niedoszacowanie w analizowanym zbiorze wynosiło ok. 10%, a wartość średnia niedoszacowania ze wszystkich pomiarów – 3%. Przy testowaniu przejazdów w kolumnach osiągnięto podobną zgodność predykcji z rzeczywistością.

W kolejnych testach wykonano przejazdy „losowe". Uzyskano wysoką zgodność „zważonych" mas z rzeczywistością, choć maksymalne niedoszacowanie masy w próbie osiągnęło 14% przy wartości średniej wynoszącej 6%. Zestawienie wyników przejazdów losowych wskazuje na poprawną pracę algorytmu.

> **Pytania.** Czy zestaw losowych przejazdów wykonanych podczas badań może być uznany za reprezentatywny dla badanego problemu?
>
> Czy nie warto byłoby wykonać symulacji numerycznej przejazdu potoków pojazdów? Taki generator ruchu mógłby być pożądanym narzędziem badawczym lub projektowym.

3.6. Podsumowanie

Autor dokonał podsumowania pracy. Wyróżnia przede wszystkim proces zbierania danych, tworząc schemat cyfrowego bliźniaka złożony z części rzeczywistej, wirtualnej i analitycznej. Stwierdza, że teza została potwierdzona, a głównym osiągnięciem jest wdrożony system ważenia pojazdów w ruchu na rzeczywistym moście. Jako kierunki dalszych badań wskazuje samouczącą się, ciągłą aktualizację modelu MES na podstawie danych długoterminowych oraz integrację z BIM i wizualizacją.

Recenzent w pełni zgadza się z wnioskami zawartymi w podsumowaniu.

4. Ocena pracy

Praca zawiera komplet zagadnień potrzebnych do zrealizowania celów. Pod względem formalnym jest napisana poprawnie i czytelnie, choć niektóre rysunki i tabele mogłyby być opracowane w bardziej przejrzysty sposób (np. rys. 5.6 i 5.7). Przytaczanie w tekście głównym zapisów w języku programowania nie powinno mieć miejsca – właściwym miejscem dla nich są załączniki. Mimo to trzeba podkreślić, że praca napisana jest w sposób zrozumiały.

W recenzji przedstawiono szereg uwag, pytań i komentarzy. Nie mają one zasadniczego wpływu na ocenę recenzowanej pracy, mogą jednak stanowić przyczynek do dyskusji.

Autor przedstawił szeroki przegląd literatury związanej z tworzeniem i zastosowaniem sieci neuronowych, algorytmów genetycznych i heurystycznych metod optymalizacji. Szerokie i wszechstronne zastosowanie tych procedur oraz rozwiązanie problemu stanowią same w sobie znaczące osiągnięcie. Krytyczne podejście do architektury i parametrów sieci neuronowych oraz parametrów algorytmów genetycznych, wyrażające się w przeprowadzonych analizach wrażliwości, świadczy o dociekliwości Doktoranta i o rzetelności naukowej przy poznawaniu i wdrażaniu metod obliczeniowych.

Niewątpliwie wysoko należy ocenić techniczną stronę działalności naukowej Doktoranta. Składają się na nią rozpoznanie badanej konstrukcji mostu, rozpoznanie i wdrożenie urządzeń i czujników pomiarowych, opracowanie architektury systemu pomiarowego oraz zaprojektowanie cyklu badań na moście. Na docenienie zasługuje skuteczne sprzężenie oprogramowania komercyjnego z własnymi procedurami obliczeniowymi.

Uznanie budzi również technika zbierania i obróbki danych pomiarowych z uwzględnieniem czynników dynamicznych oraz znajdowania konfiguracji początkowej w procesie pomiaru odkształceń.

Podsumowując, w recenzowanej pracy należy szczególnie docenić jej strukturę. Jest to klasyczny przykład zastosowania nowoczesnych technik i narzędzi do rozwiązania ważnego problemu naukowego i technicznego, zakończony wdrożeniem. Znaczenie pracy jest bardzo duże. Autor udowadnia, że można w stosunkowo prosty sposób prowadzić pomiary ruchu na drogach z uwzględnieniem masy pojazdów. Umożliwia to prowadzenie badań i statystyk dotyczących norm i modeli obciążeń mostów, pozwala na rozwinięcie diagnostyki obiektów w zakresie oceny nośności doraźnej, zmęczeniowej i trwałości oraz otwiera nowe możliwości w zakresie technik SHM dla innych typów konstrukcji.

Praca ma zdecydowanie naukowy charakter, połączony z praktycznym wdrożeniem. Jednym z jej efektów jest funkcjonujący, pionierski system ważenia pojazdów w ruchu. Tym samym praca pokazuje, że zagadnienia opracowane teoretycznie mogą być z sukcesem wdrożone w praktyce.

5. Ocena końcowa pracy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Dawida Piotrowskiego pt. *„Implementacja algorytmów optymalizacyjnych i technik sztucznej inteligencji w procesie tworzenia cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych"* ma wartość pracy naukowej i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Dotyczy bardzo aktualnych problemów współczesnego projektowania i utrzymania obiektów mostowych oraz wskazuje szerokie możliwości stosowania sieci neuronowych i procesów optymalizacyjnych w praktyce.

Zgodnie z wymogami art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) recenzowana rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Przedmiotem rozprawy jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej. Wymogi ustawowe są zatem spełnione.

6. Wniosek końcowy

Na podstawie przedłożonej rozprawy stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr. inż. Dawida Piotrowskiego spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571) i może stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia doktora.

W związku z powyższym składam przed Wysoką Radą Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej w Gliwicach wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Składam również przed Wysoką Radą wniosek o wyróżnienie pracy.

dr hab. inż. Krzysztof Żółtowski, prof. uczelni