Wm recenzja spełnia wymagane formalne

Kraków, dnia 18 września 2026 r.

dr hab. inż. Maciej Kłaczyński, prof. AGH
Katedra Mechaniki i Wibroakustyki
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademia Górniczo – Hutnicza im. Stanisława Staszica
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Piotrowskiego pt. *„Implementacja algorytmów optymalizacyjnych i technik sztucznej inteligencji w procesie tworzenia cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych”*

1. Wstęp

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Dawida Piotrowskiego pt. „Implementacja algorytmów optymalizacyjnych i technik sztucznej inteligencji w procesie tworzenia cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych” została wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport nr 40/2026 z dnia 9.07.2026r. oraz pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport, Pana Prof. dr hab. inż. Piotra Folęgi z dnia 10.07.2026r. (sygn. RDILGT.512.4.2026) oraz właściwej przedmiotowej umowy.

Ocena rozprawy została przygotowana zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami).

2. Ocena rozprawy doktorskiej

2.1 Uwagi o wyborze tematyki pracy

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój metod monitorowania stanu obiektów technicznych w tym dużych infrastruktur inżynierii lądowej, w szczególności mostów stanowiących jeden z najważniejszych elementów systemów transportowych. Rosnące wymagania dotyczące bezpieczeństwa eksploatacji, trwałości konstrukcji oraz optymalizacji kosztów utrzymania powodują, że tradycyjne metody okresowych przeglądów technicznych są coraz częściej uzupełniane przez zaawansowane systemy ciągłego monitoringu konstrukcji (Structural Health Monitoring - SHM), modelowania numerycznego oraz narzędzia sztucznej inteligencji. Jednocześnie rozwój technologii cyfrowych doprowadził do powstania koncepcji cyfrowego bliźniaka (Digital Twin), która stanowi jedno z najbardziej perspektywicznych narzędzi wspomagających zarządzanie infrastrukturą techniczną. Cyfrowy bliźniak umożliwia integrację informacji pochodzących z pomiarów rzeczywistych, modeli numerycznych oraz algorytmów analitycznych w celu możliwie wiernego odwzorowania zachowania obiektu podczas eksploatacji. W przypadku obiektów mostowych zagadnienie to ma szczególne znaczenie, ponieważ konstrukcje te podlegają zmiennym obciążeniom ruchomym, wpływom

Wpłynęło dnia 28.09.2026 r.

środowiskowym oraz procesom degradacyjnym zachodzącym w długim okresie użytkowania. Na tym tle tematyka podjęta przez mgr. inż. Dawida Piotrowskiego jest w pełni uzasadniona zarówno z naukowego, jak i praktycznego punktu widzenia. Autor podjął próbę rozwiązania istotnego problemu badawczego polegającego na integracji systemu monitoringu konstrukcji, modeli elementów skończonych, algorytmów optymalizacyjnych oraz metod uczenia maszynowego w ramach jednego spójnego środowiska cyfrowego bliźniaka. Szczególnie wartościowym aspektem pracy jest skoncentrowanie badań na możliwości identyfikacji rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych mostu, co ma bezpośrednie znaczenie dla oceny bezpieczeństwa konstrukcji oraz racjonalnego zarządzania jej cyklem życia. Należy podkreślić, że problematyka cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych nadal pozostaje jednym z najbardziej intensywnie rozwijanych kierunków badawczych w światowej literaturze naukowej. Mimo znacznego postępu w zakresie monitoringu konstrukcji i metod sztucznej inteligencji nadal istnieją istotne wyzwania związane z kalibracją modeli numerycznych, integracją danych pomiarowych oraz wiarygodną identyfikacją rzeczywistych obciążeń działających na konstrukcję. Rozprawa wpisuje się zatem w aktualne potrzeby rozwoju dyscypliny i stanowi próbę odpowiedzi na istotne pytania badawcze znajdujące się na styku inżynierii lądowej, mechaniki konstrukcji, optymalizacji obliczeniowej oraz sztucznej inteligencji. Dodatkowo mocną stroną podjętej tematyki jest jej wysoki potencjał aplikacyjny. Zaproponowane rozwiązania mogą znaleźć zastosowanie w nowoczesnych systemach zarządzania infrastrukturą mostową, wspomagać wykrywanie przeciążeń konstrukcji, a także stanowić element przyszłych systemów predykcyjnego utrzymania obiektów inżynierskich. Biorąc pod uwagę powyższe uważam, że wybór tematu pracy należy uznać za trafny, aktualny oraz dobrze odpowiadający współczesnym kierunkom rozwoju badań naukowych i praktyki inżynierskiej.

2.2 Charakterystyka pracy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska liczy 185 stron i składa się z 6 rozdziałów głównych wraz licznymi podrozdziałami tworzącymi przejrzystą i logiczną strukturę pracy, oraz bibliografii zawierającej 156 pozycji literaturowych i 14 norm technicznych. W pracy zamieszczono rozbudowany wykaz oznaczeń obejmujący symbole używane oddzielnie w rozdziałach 2, 3, 4 i 5. Sam wykaz zajmuje pięć strony rozprawy i łącznie zawiera on ok. 100 oznaczeń matematycznych i fizycznych. Ponadto zamieszczono wykaz skrótów występujących w dysertacji obejmujący 25 pozycji.

Rozdział pierwszy rozprawy stanowi wprowadzenie do problematyki badawczej oraz uzasadnienie podjęcia tematu. Autor przedstawia w nim koncepcję cyfrowych bliźniaków (Digital Twin), omawia ich rozwój oraz rosnące znaczenie w monitorowaniu i zarządzaniu infrastrukturą mostową. Szczególną uwagę poświęcono możliwości integracji danych pomiarowych, modeli numerycznych oraz metod sztucznej inteligencji w celu tworzenia cyfrowych reprezentacji rzeczywistych obiektów inżynierskich. W rozdziale omówiono również aktualny stan wiedzy dotyczący monitoringu konstrukcji (SHM), identyfikacji obciążeń eksploatacyjnych oraz zastosowania metod uczenia maszynowego w inżynierii mostowej.

Autor dokonuje przeglądu literatury, wskazuje istniejące ograniczenia obecnych rozwiązań oraz identyfikuje lukę badawczą, która stanowi podstawę do realizacji własnych badań. Istotnym elementem rozdziału jest także sformułowanie celu głównego pracy, celów szczegółowych oraz tezy badawczej. Autor uzasadnia potrzebę opracowania metodyki budowy cyfrowego bliźniaka mostu umożliwiającego rekonstrukcję rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych na podstawie danych z systemu monitoringu. W końcowej części rozdziału przedstawiono wprowadzenie w problematykę badań, uzasadnienie aktualności podjętego tematu oraz jasno określono cele i kierunki dalszych analiz przedstawionych w kolejnych rozdziałach rozprawy.

Drugi rozdział rozprawy zatytułowany „System monitoringu SHM mostu M-7L w Wolinie" poświęcono przedstawieniu badanego obiektu mostowego oraz opracowanego systemu monitoringu konstrukcji stanowiącego podstawę budowanego cyfrowego bliźniaka. Autor rozpoczyna rozdział od przeglądu literatury dotyczącej systemów SHM, technologii światłowodowych FBG, metod lokalizacji czujników oraz sposobów przetwarzania danych pomiarowych. W dalszej części przedstawiono szczegółową charakterystykę mostu łukowego M-7L w Wolinie, opis jego konstrukcji, materiałów oraz przyjętego modelu numerycznego MES. Szczególną uwagę poświęcono analizie statycznej konstrukcji, na podstawie której wyznaczono linie wpływu charakterystycznych elementów oraz zoptymalizowano rozmieszczenie punktów pomiarowych. Dzięki temu obiekt podzielono na trzy niezależne bramki pomiarowe zlokalizowane w 1/4, 1/2 i 3/4 rozpiętości przęsła. Istotnym elementem rozdziału jest szczegółowy opis wdrożonego systemu pomiarowego. Autor omawia zastosowane światłowodowe czujniki odkształceń i temperatury bazujące na technologii siatki Bragga (FBG), sposób ich montażu na poprzecznicach, ściągach i wieszakach, organizację torów światłowodowych oraz aparaturę służącą do akwizycji danych. Przedstawiono również pomiary towarzyszące obejmujące monitoring urządzeń dylatacyjnych i łożysk mostowych. Rozdział kończy analiza niepewności pomiarów, w której Autor określa źródła błędów systemu oraz wyznacza względną niepewność rozszerzoną na poziomie 4,70%. W rezultacie rozdział zawiera pełny opis warstwy pomiarowej cyfrowego bliźniaka, stanowiącej podstawę dalszych badań eksperymentalnych, identyfikacji modelu MES oraz późniejszej implementacji algorytmów sztucznej inteligencji.

Trzeci rozdział, zatytułowany „Badania pod próbnym obciążeniem", przedstawia program badań eksperymentalnych przeprowadzonych na moście M-7L w Wolinie. Celem tych badań była weryfikacja poprawności działania systemu monitoringu SHM, ocena rzeczywistej odpowiedzi konstrukcji na obciążenia oraz pozyskanie danych niezbędnych do późniejszej identyfikacji modelu MES i budowy algorytmów sztucznej inteligencji. W pierwszej części rozdziału Autor opisuje środki obciążające wykorzystane podczas badań. Zastosowano dziewięć pojazdów ciężarowych o zróżnicowanej geometrii, liczbie osi oraz masie całkowitej mieszczącej się w przedziale od około 28 do 42 ton. Przedstawiono również ich parametry geometryczne, naciski osi oraz wyniki ważenia wykonane przed rozpoczęciem badań.

Następnie zaprezentowano przebieg badań statycznych, obejmujących pięć schematów obciążenia, w tym trzy schematy zlokalizowane bezpośrednio nad poszczególnymi bramkami pomiarowymi oraz dwa przypadki niesymetryczne. Analizie poddano wartości odkształceń rejestrowanych przez system SHM i oceniono zachowanie konstrukcji pod wpływem kontrolowanych obciążeń. Kolejna część rozdziału poświęcona jest badaniom dynamicznym, obejmującym przejazdy pojedynczych pojazdów, przejazdy kolumn pojazdów oraz przejazdy losowe odwzorowujące rzeczywisty ruch drogowy. Autor analizuje wpływ położenia pojazdu, prędkości przejazdu oraz liczby pojazdów na zarejestrowane odkształcenia, potwierdzając wcześniejsze założenia wynikające z analiz statycznych. W szczególności wykazano lokalny charakter odpowiedzi poprzecznic oraz globalny charakter pracy wieszaków. Rozdział kończy podsumowanie wyników badań, w którym Autor stwierdza, że przeprowadzone pomiary potwierdziły poprawność rozmieszczenia punktów pomiarowych oraz możliwość wykorzystania zarejestrowanych odkształceń do identyfikacji pojazdów i ich obciążeń. Uzyskane dane eksperymentalne zostały następnie wykorzystane w procesie kalibracji modelu MES oraz generowania syntetycznych zbiorów danych dla modeli uczenia maszynowego opisanych w dalszej części rozprawy.

Czwarty rozdział rozprawy, zatytułowany „Identyfikacja modelu numerycznego MES", poświęcono opracowaniu i realizacji procedury kalibracji modelu numerycznego mostu M-7L. Głównym celem tego etapu badań było uzyskanie możliwie wiernego odwzorowania rzeczywistej pracy konstrukcji poprzez dopasowanie odpowiedzi modelu MES do wyników pomiarów uzyskanych podczas próbnego obciążenia. Autor przedstawia przegląd literatury dotyczącej identyfikacji modeli MES, omawia zmienne decyzyjne, funkcje celu oraz metody optymalizacji wykorzystywane w tego typu problemach. W dalszej części rozdziału zaprezentowano autorską procedurę identyfikacji wykorzystującą algorytm genetyczny, w którym zmiennymi decyzyjnymi były moduły sprężystości wybranych elementów konstrukcyjnych. Funkcję celu zdefiniowano jako miarę rozbieżności pomiędzy odkształceniami uzyskanymi z modelu MES a wartościami zarejestrowanymi przez system monitoringu SHM podczas badań statycznych. Autor szczegółowo opisuje parametry algorytmu genetycznego, operacje selekcji, krzyżowania i mutacji oraz sposób wyznaczania jakości kolejnych rozwiązań. Istotnym elementem rozdziału jest wykorzystanie sieci neuronowej jako modelu zastępczego (surrogate model). W celu ograniczenia kosztu obliczeniowego wielokrotnych analiz MES wygenerowano syntetyczny zbiór danych treningowych, na którym wytrenowano model neuronowy przewidujący odpowiedź konstrukcji. Następnie model ten został zintegrowany z algorytmem genetycznym, umożliwiając znaczne przyspieszenie procesu optymalizacji przy zachowaniu wysokiej dokładności wyników. Końcowa część rozdziału zawiera analizę rezultatów identyfikacji. Autor porównuje skuteczność procedury opartej bezpośrednio na modelu MES oraz procedury wykorzystującej model zastępczy. Wykazano znaczącą poprawę zgodności modelu z wynikami pomiarów, redukując średni błąd MAPE z około 15,65% dla modelu początkowego do około 8,41% po przeprowadzeniu identyfikacji. Uzyskane wyniki potwierdziły skuteczność

zaproponowanego podejścia i umożliwiły wykorzystanie skalibrowanego modelu MES jako cyfrowego odpowiednika rzeczywistej konstrukcji w dalszych etapach badań.

Piąty rozdział rozprawy, zatytułowany „Predykcja masy całkowitej pojazdów z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego", poświęcono opracowaniu i walidacji systemu ważenia pojazdów w ruchu (BWIM), stanowiącego kluczowy element warstwy informacyjnej cyfrowego bliźniaka mostu. Autor rozpoczyna rozdział od przeglądu literatury dotyczącej klasycznych systemów WIM i BWIM oraz wskazuje istniejące ograniczenia tych metod, formułując jednocześnie lukę badawczą uzasadniającą zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji. W dalszej części przedstawiono założenia opracowanego rozwiązania, metody przetwarzania sygnałów pomiarowych oraz procedurę przygotowania danych wejściowych. Szczegółowo opisano proces filtracji sygnałów odkształceń przy użyciu filtru Butterwortha oraz wyznaczania cech wykorzystywanych następnie przez modele predykcyjne. Istotnym elementem rozdziału jest opis procesu doboru architektury modeli sieci neuronowych. Autor zastosował algorytm optymalizacji roju cząstek (PSO), który służył do automatycznego wyboru liczby warstw ukrytych, liczby neuronów, funkcji aktywacji oraz parametrów uczenia sieci. Ostatecznie wykorzystano modele typu MLP (Multilayer Perceptron), przeznaczone do rozwiązywania problemu regresji masy całkowitej pojazdu. Najobszerniejszą część rozdziału stanowi analiza wyników predykcji mas pojazdów. Autor ocenia skuteczność opracowanych modeli dla przejazdów pojedynczych, przejazdów grupowych oraz ruchu losowego odwzorowującego rzeczywiste warunki eksploatacyjne. Przeprowadzono również analizę wpływu prędkości przejazdu i dodatkowych oddziaływań dynamicznych na dokładność predykcji. Rozdział kończy syntetyczne podsumowanie wyników, w którym wykazano, że opracowany system pozwala na identyfikację mas pojazdów z błędami średnimi na poziomie około 7–8%. Uzyskane rezultaty potwierdzają możliwość skutecznego wykorzystania danych z monitoringu SHM, skalibrowanego modelu MES oraz algorytmów uczenia maszynowego do rekonstrukcji rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych mostu.

Szósty rozdział rozprawy stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań oraz syntetyczne zestawienie najważniejszych osiągnięć naukowych i aplikacyjnych autora. Autor dokonuje oceny stopnia realizacji celu głównego pracy oraz weryfikuje postawioną tezę dotyczącą możliwości budowy cyfrowego bliźniaka obiektu mostowego umożliwiającego identyfikację rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych. W rozdziale tym przedstawiono najważniejsze rezultaty uzyskane na kolejnych etapach badań, począwszy od opracowania i wdrożenia systemu monitoringu SHM, poprzez identyfikację modelu MES z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, aż po opracowanie modeli sztucznej inteligencji służących do estymacji mas pojazdów przejeżdżających przez most. Autor podkreśla uzyskaną poprawę zgodności modelu numerycznego z wynikami pomiarów oraz skuteczność opracowanego systemu BWIM osiągającego błędy predykcji na poziomie około 7–8%. Istotnym elementem rozdziału jest również wskazanie oryginalnych osiągnięć naukowych rozprawy, do których zaliczono opracowanie kompletnej metodyki budowy cyfrowego bliźniaka mostu, integrację systemu SHM, modelu MES i metod sztucznej inteligencji oraz wykorzystanie danych

syntetycznych generowanych przez skalibrowany model numeryczny do trenowania modeli predykcyjnych. W końcowej części rozdziału autor wskazuje potencjalne kierunki dalszych badań i rozwoju przedstawionej metodyki. Z perspektywy recenzenta rozdział szósty został opracowany poprawnie, stanowi logiczne zakończenie rozprawy oraz potwierdza realizację założonych celów badawczych i słuszność postawionej tezy.

2.3 Uwagi krytyczne

Przedłożona rozprawa stanowi wartościowe opracowanie naukowe, jednak podczas lektury nasunęło mi się kilka uwag i pytań o charakterze metodologicznym, interpretacyjnym oraz redakcyjnym.

1. Udział autora w realizacji badań eksperymentalnych.

Autor przedstawia przebieg badań eksperymentalnych przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie mostowym, jednak w rozprawie nie określono jednoznacznie, które elementy programu badawczego zostały wykonane samodzielnie przez doktoranta, a które stanowiły rezultat pracy zespołowej. Dotyczy to w szczególności takich działań, jak przygotowanie i instalacja systemu pomiarowego, realizacja próbnych obciążeń, obsługa aparatury pomiarowej, akwizycja danych oraz ich wstępne opracowanie. Kwestia ta ma istotne znaczenie z punktu widzenia oceny indywidualnego wkładu naukowego autora. Należy zauważyć, że badania terenowe realizowane na rzeczywistych obiektach mostowych mają z reguły charakter zespołowy i wymagają zaangażowania specjalistów reprezentujących różne obszary kompetencji. W związku z tym pożądane byłoby wyraźne wskazanie zakresu odpowiedzialności doktoranta na poszczególnych etapach badań oraz jednoznaczne określenie jego wkładu własnego w przygotowanie, realizację i interpretację wyników eksperymentów. Uwaga ta nie umniejsza wartości naukowej rozprawy, jednak doprecyzowanie zakresu udziału autora pozwoliłoby na bardziej jednoznaczną ocenę jego samodzielności badawczej oraz rzeczywistego wkładu w realizację przedstawionych badań.

2. Niejednoznaczność pojęcia „cyfrowy bliźniak".

Jednym z istotnych pojęć rozprawy jest „cyfrowy bliźniak", jednak po lekturze pracy pozostaje pewna niejednoznaczność dotycząca jego ostatecznej definicji. Autor stosuje zamiennie lub częściowo nakładająco się pojęcia: cyfrowy bliźniak, system SHM, system BWIM, model MES. Mimo szerokiego omówienia zagadnienia brakuje jednoznacznego wskazania, który z opisanych elementów jest właściwym cyfrowym bliźniakiem, a które stanowią jedynie jego komponenty. W rezultacie czytelnik może mieć trudność z określeniem granic funkcjonalnych proponowanego rozwiązania. W mojej opinii wskazane byłoby sformułowanie pod koniec pracy precyzyjnej definicji cyfrowego bliźniaka przyjętej przez autora oraz jednoznaczne określenie architektury systemu w postaci diagramu pokazującego zależności pomiędzy SHM, MES, algorytmami sztucznej inteligencji i modułem BWIM.

3. Ograniczone porównanie zastosowanej architektury sieci neuronowej.

Na wstępie trudno zidentyfikować dokładny typ sieci neuronowej zastosowanej w pracy, ponieważ w tekście nie pojawia się jednoznaczne określenie architektury modelu. Dopiero szczegółowa analiza przedstawionych implementacji pozwala stwierdzić, że wykorzystano wielowarstwowe sieci neuronowe typu MLP. Wątpliwości budzi jednak brak porównania uzyskanego rozwiązania z innymi metodami uczenia maszynowego. Przy stosunkowo niewielkiej liczbie cech wejściowych istnieje duże prawdopodobieństwo, że modele drzewiaste, takie jak Random Forest, XGBoost lub LightGBM, mogłyby osiągnąć porównywalną, a być może nawet wyższą skuteczność predykcji przy znacznie mniejszej złożoności modelu oraz lepszej interpretowalności wyników. Porównanie kilku klas modeli uczenia maszynowego pozwoliłoby silniej uzasadnić wybór sieci neuronowych jako rozwiązania optymalnego dla rozważanego problemu.

4. Wykorzystanie danych syntetycznych generowanych przez model MES.

Istotnym elementem metodologii pracy jest wykorzystanie danych syntetycznych generowanych przez skalibrowany model MES do budowy zbiorów treningowych dla modeli sztucznej inteligencji. Podejście to jest interesujące i nowoczesne, jednak rodzi pytania dotyczące przenoszenia błędów pomiędzy modelem fizycznym a modelem sztucznej inteligencji. Jakość końcowo wytrenowanej sieci neuronowej jest bowiem bezpośrednio zależna od jakości modelu MES. Oznacza to, że ewentualne błędy i uproszczenia modelu numerycznego mogą zostać utrwalone również w modelu predykcyjnym. W pracy zabrakło szerszej dyskusji dotyczącej odporności opracowanego rozwiązania na długoterminowe procesy zachodzące w konstrukcji mostowej, takie jak: degradacja materiałów, zmiany sztywności elementów, zmęczenie konstrukcji, wpływ warunków środowiskowych, zmiany parametrów eksploatacyjnych obiektu. Interesujące byłoby również przedstawienie możliwości okresowej aktualizacji modelu oraz jego dalszego uczenia na podstawie danych rzeczywistych pozyskiwanych podczas eksploatacji obiektu.

5. Analiza niepewności.

Autor poświęca uwagę zagadnieniu niepewności pomiarowej, jednak analiza ta koncentruje się głównie na budżecie niepewności układu pomiarowego. W pracy brakuje pełniejszego przedstawienia: poszczególnych składowych niepewności, udziału niepewności cząstkowych, wartości niepewności rozszerzonej dla kluczowych wyników, wpływu przyjętych założeń modelowych na końcowe wyniki obliczeń. Szczególnie interesująca byłaby analiza niepewności numerycznej związanej z kalibracją modelu MES, doborem parametrów algorytmu genetycznego, procesem trenowania sieci neuronowej, zmiennością wyników uzyskiwanych przy różnych inicjalizacjach modeli. Uwzględnienie tych aspektów pozwoliłoby na pełniejszą ocenę wiarygodności uzyskanych rezultatów.

6. Problem identyfikowalności parametrów modelu MES.

W procesie kalibracji modelu MES identyfikowano znaczną liczbę parametrów opisujących właściwości konstrukcji. Nie przedstawiono jednak analizy jednoznaczności

rozwiązania problemu odwrotnego. Powstaje pytanie, czy uzyskany zestaw parametrów jest rozwiązaniem unikalnym, czy też istnieją inne konfiguracje parametrów prowadzące do podobnego poziomu zgodności z wynikami pomiarów. Analiza korelacji pomiędzy parametrami oraz badanie identyfikowalności modelu zwiększyłyby wiarygodność procesu kalibracji.

7. Brak niezależnej walidacji modelu MES.

Model MES został skalibrowany na podstawie danych pochodzących z próbnego obciążenia obiektu. W pracy zabrakło jednak walidacji modelu na całkowicie niezależnym zbiorze danych pomiarowych. Z punktu widzenia metodologii modelowania numerycznego byłoby pożądane wykazanie, że uzyskany model zachowuje odpowiednią dokładność nie tylko dla przypadków wykorzystanych do kalibracji, ale również dla innych konfiguracji obciążenia.

8. Ograniczona analiza dynamiczna konstrukcji.

Badania skoncentrowano głównie na odpowiedzi quasi-statycznej konstrukcji. Tymczasem cyfrowy bliźniak obiektu mostowego powinien w idealnym przypadku umożliwiać również poprawne odwzorowanie parametrów dynamicznych konstrukcji. W pracy nie przeprowadzono szczegółowej identyfikacji częstotliwości własnych, postaci drgań ani aktualizacji parametrów dynamicznych modelu. Rozszerzenie badań o ten aspekt mogłoby stanowić wartościowy kierunek dalszych prac naukowych.

9. Ograniczona analiza awarii i odporności systemu.

Rozprawa przedstawia rozwiązanie działające w warunkach poprawnej pracy wszystkich komponentów systemu. Nie omówiono natomiast zachowania opracowanego cyfrowego bliźniaka w sytuacjach awaryjnych, takich jak uszkodzenie pojedynczego czujnika, utrata części danych pomiarowych, błędy transmisji danych, błędna kalibracja elementów systemu. Ponieważ odporność na takie zjawiska jest jedną z kluczowych cech systemów monitoringu infrastruktury krytycznej, zagadnienie to zasługiwałoby na szerszą analizę.

Przedstawione uwagi mają charakter głównie dyskusyjny i metodologiczny. Nie podważają one wartości naukowej rozprawy ani poprawności osiągniętych rezultatów, lecz wskazują obszary, które mogłyby zostać rozwinięte w dalszych badaniach autora. W mojej ocenie wymienione ograniczenia nie wpływają na pozytywną ocenę rozprawy jako całości.

Podsumowując stwierdzam, że podjęty problem badawczy został sformułowany poprawnie, tak pod względem obszaru merytorycznego, prowadzonych rozważań, analiz i przeprowadzonych badań. Z punktu widzenia określonej tezy i celów szczegółowych, podjęta koncepcja badań jest w pełni uzasadniona, a zastosowane metody badawcze są adekwatne. Stwierdzam, że zarówno materiał literaturowy jak i badawczy został przez Autora rozprawy wykorzystany poprawnie. Na podstawie treści pracy można w sposób jednoznaczny ocenić wkład własny Doktoranta jako m.in. opracowanie metodyki budowy cyfrowego bliźniaka obiektu mostowego integrującej dane z monitoringu SHM, model MES oraz algorytmy uczenia maszynowego; opracowanie procedury identyfikacji i kalibracji modelu MES z wykorzystaniem algorytmu genetycznego oraz analizę jej skuteczności; opracowanie modelu zastępczego opartego na sieciach neuronowych przyspieszającego proces identyfikacji numerycznej,

wygenerowanie i wykorzystanie syntetycznych zbiorów danych do trenowania modeli predykcyjnych; zaprojektowanie, optymalizację i walidację modeli neuronowych MLP służących do identyfikacji mas pojazdów na podstawie odpowiedzi konstrukcji mostu; eksperymentalną weryfikację całego rozwiązania w warunkach rzeczywistego ruchu drogowego. Za najważniejsze oryginalne osiągnięcie naukowe autora należy uznać opracowanie i praktyczną weryfikację kompletnej procedury tworzenia cyfrowego bliźniaka mostu umożliwiającego identyfikację rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych poprzez połączenie monitoringu konstrukcji, skalibrowanego modelu MES i metod sztucznej inteligencji. Przedstawione rozwiązanie zostało zweryfikowane na rzeczywistym obiekcie inżynierskim, co istotnie podnosi jego wartość naukową i aplikacyjną.

2.4 Uwagi szczegółowe i ocena poziomu edytorskiego rozprawy

Układ rozprawy jest przejrzysty a treści prezentowane w kolejnych rozdziałach są ze sobą dobrze powiązane. Praca pod względem edytorskim jest opracowana starannie.

Poniżej przedstawiono uwagi szczegółowe:

1. Strona 14: długość fali Bragga oznaczona została oznaczona λ [μm/m] oraz referencyjna długość fali Bragga została oznaczona jako λ_0 [μm/m]. Przedstawiona jednostka jest jednostka odkształcenia, a nie długości fali. Powinno być [nm].
2. Strona 50 i 51: równanie (2-1) wykorzystuje λ oraz λ_0. W tekście długości fal opisano jako zakres 1500-1600 [nm] natomiast w oznaczeniach podano [μm/m].
3. Strona 49: opis rysunku 2.9 występuje „podłużnicach (TB)", a wcześniej w teksie „TB" identyfikowane są jako punkty na ściągach (Tie Beam), nie podłużnicach.
4. W opisie materiałów występuje prawdopodobnie zamiana klas betonu. Na stronie 37 zapisano „W konstrukcji stalowej zastosowano stal klasy S460N, natomiast płyta pomostowa wykonana została z betonu klasy C50/60 dla elementów prefabrykowanych oraz C40/50 dla części monolitycznej.", natomiast na stronie 41 zapisano „Do obliczeń przyjęty został moduł sprężystości prefabrykowanej części płyty pomostowej równy Ebp = 35 GPa (beton klasy C40/50) oraz części monolitycznej Ebm = 37 GPa (beton klasy C50/60)."
5. Na stronie 60 podano, że współczynnik kc = 1,65 dla 95% przedziału ufności i rozkładu prostokątnego. Natomiast dla standardowej niepewności rozszerzonej zwykle współczynnik kc ≈ 2 dla 95% poziomu ufności i rozkładu normalnego. Należy ten fakt wyjaśnić.
6. Tabela 3.4 Tabela pojazdów trójosiowych. Dla pojazdów nr 8 i 9 pojawia się zapis: F3 = F4 = 59,4 kN i F3 = F4 = 61,6 kN przy jednoczesnym określeniu pojazdu jako trójosiowy. Pojazd trójosiowy nie powinien mieć osi F4.
7. Występują błędy literowe w pozycjach literaturowych numer 100, 128, 151: jest „Optical and Quantium Electronics", powinno być „Optical and Quantum Electronics"; jest „model udating" powinno być „model updating"; jest „reinforced conrete pedestrian cable-stayed bridge" powinno być "reinforced concrete pedestrian cable-stayed bridge"

3. Wniosek końcowy

Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Dawida Piotrowskiego pt. „Implementacja algorytmów optymalizacyjnych i technik sztucznej inteligencji w procesie tworzenia cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych" stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego, prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie, potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia przez niego prac naukowych oraz wnosi istotny wkład w rozwój Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę z dnia 20 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2021r. poz.478 z późn. zm.) i wnioskuję o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

Recenzję podpisał
Maciej Kłaczyński