Recenzja spełnia wymagane formalne

Dr hab. inż. Jarosław Korzeb, prof. PW
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu
Zakład Budowy i Eksploatacji Środków Transportu
ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
e-mail: jaroslaw.korzeb@pw.edu.pl

Warszawa, 18 września 2026 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
autorstwa mgr inż. Dawida Piotrowskiego
pt.
„Implementacja algorytmów optymalizacyjnych i technik sztucznej inteligencji w procesie tworzenia cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych"

Promotor rozprawy:	Dr hab. inż. Artur Nowoświat, prof. PS.
Opiekun pomocniczy:	dr inż. Piotr Łaziński
Dziedzina nauki:	Nauki Inżynieryjno-Techniczne
Dyscyplina naukowa:	Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

I. Podstawy opracowania recenzji

Podstawy formalne opracowania recenzji:

- pismo Pana Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Śląskiej, Prof. dr hab. inż. Piotra Folęgi (nr RDILGIT.512.4.2026, nr rej. RDILGIT/32/2026, z dnia 17.07.2026) i umowa nr UMC/2699/2026;
- uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport 40/2026 z dnia 09.07.2026;
- egzemplarz rozprawy doktorskiej mgr inż. Dawida Piotrowskiego w wersji drukowanej oraz elektronicznej.

Uwzględnione podstawy prawne podczas opracowania recenzji rozprawy doktorskiej:

- Ustawa z dnia z dnia 20.07.2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.),
- Obwieszczenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 12 lutego 2025 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Edukacji i Nauki i z dnia 11 października 2022 r.w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych (Dz.U. z 2025 r. poz. 211).

W toku opracowywania recenzji szczególną uwagę poświęcono analizie i ocenie poziomu merytorycznego treści prezentowanych w pracy. Przeanalizowano zarówno strukturę rozprawy, jak i jej układ logiczny oraz poprawność zastosowanej terminologii naukowej w odniesieniu do przyjętego zakresu tematycznego. Zaopiniowano spójność i trafność wywodu w kontekście postawionych celów badawczych, a także zgodność sformułowanych wniosków z uzyskanymi wynikami w ramach prowadzonych prac.

Przy ocenie rozprawy zwrócono uwagę przede wszystkim na to, czy podjęta problematyka ma charakter naukowy oraz czy jej cel i zakres odpowiadają wymaganiom

Wpłynęło dnia 28.09.2026 r.

stawianym rozprawie doktorskiej. Oceniono również oryginalność przyjętego podejścia oraz znaczenie uzyskanych wyników dla rozwoju dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Analizie poddano także dobór literatury, jej aktualność i adekwatność do omawianych zagadnień, a także sposób wykorzystania i powiązania cytowanych prac z prowadzonym wywodem.

Osobno oceniono sposób przedstawienia treści, przejrzystość argumentacji oraz poziom języka technicznego i naukowego. Zwrócono również uwagę na stronę formalną rozprawy, w tym poprawność zapisów liczbowych, symboli, tabel i wykresów. Sprawdzono konsekwencję stosowania jednostek układu SI oraz poprawność i spójność przyjętych oznaczeń.

II. Ogólny układ rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska liczy 185 stron, na które składają się: strona tytułowa (2 strony), podziękowania i streszczenia (6), spis treści (4 strony) i wykaz oznaczeń i skrótów (8 stron), pięć rozdziałów autorskich (144 strony), podsumowanie (4 strony) oraz bibliografia (17 stron). Odpowiednie zestawienia liczbowe charakteryzujące przedstawiony do recenzji materiał z podziałem na rozdziały zamieszczono w poniższej tabeli.

Rozdział	Liczba			
	rysunków	tabel	równań	stron
Str. tytułowa				2
Streszczenie i Abstract i podziękowania				6
Spis treści				4
Wykaz oznaczeń i skrótów				8
1. Wprowadzenie	1			6
2. System monitoringu SHM mostu M-7L w Wolinie	21	3	6	36
3. Badania pod próbnym obciążeniem	21	5		22
4. Identyfikacja modelu numerycznego MES	16	12	17	48
5. Predykcja masy całkowitej pojazdów ...	13	7	5	32
6. Podsumowanie	1			4
Bibliografia				17
Razem	**73**	**27**	**28**	**185**

Spis bibliografii obejmuje łącznie 170 pozycji, w tym 156 publikacji naukowych oraz 14 dokumentów ujętych przez autora jako standardy techniczne. Wśród publikacji naukowych zidentyfikowano 150 artykułów w czasopismach oraz 6 publikacji konferencyjnych. Nie odnotowano książek, monografii, rozdziałów monograficznych ani rozpraw doktorskich. Literatura jest nader aktualna, ponieważ 125 pozycji naukowych, stanowiących 80,1% tej części wykazu, opublikowano w latach 2021–2026. Zastrzeżenie budzi natomiast nazwanie pozycji ST1–ST14 „standardami technicznymi", gdyż grupa ta nie zawiera formalnych norm PN, EN ani ISO, lecz przede wszystkim dokumentację producentów aparatury, jedną krajową ocenę techniczną oraz wytyczne metrologiczne. W wykazie literatury stwierdzono również

pojedyncze niekompletne lub niepoprawne opisy bibliograficzne. Treść pracy obejmuje ponadto bogaty materiał ilustracyjny, na który składa się 73 rysunki i fotografie oraz 27 tabel.

II.1. Tematyka i zakres rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska dotyczy jednego z istotniejszych problemów współczesnej inżynierii mostowej, jakim jest wykorzystanie danych pomiarowych i modeli numerycznych do bieżącego rozpoznawania sposobu eksploatacji obiektu, co wpisuje się w ideę eksploatacji ze zautomatyzowanym nadzorem. Autor nie utożsamia cyfrowego bliźniaka ani z modelem informacyjnym obiektu BIM, ani z modelem obliczeniowym MES, lecz wiąże tę koncepcję z integracją rzeczywistej konstrukcji, systemu monitoringu, modeli numerycznych oraz algorytmów interpretujących rejestrowane dane. Głównym zadaniem opracowanego rozwiązania jest identyfikacja rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych, a w szczególności szacowanie masy całkowitej pojazdów przejeżdżających przez most. Zagadnienie to jest złożone, ponieważ odkształcenia rejestrowane na konstrukcji zależą nie tylko od masy każdego pojazdu, lecz również od konfiguracji osi, położenia na jezdni, prędkości, oddziaływań dynamicznych, nierówności nawierzchni oraz lokalnych właściwości samego obiektu. Badania przeprowadzono na moście łukowym M-7L w Wolinie, wyposażonym w system monitoringu wykorzystujący światłowodowe czujniki z siatką Bragga. W takim ujęciu rzeczywisty most, aparatura pomiarowa, model MES oraz modele regresyjne nie są odrębnymi obiektami badawczymi, ale kolejnymi składnikami warstwy informacyjnej, którą Autor określa mianem cyfrowego bliźniaka.

Rozmieszczenie czujników poprzedzono analizą statyczną i wyznaczeniem teoretycznych linii wpływu poprzecznic, podłużnic oraz wieszaków, dzięki czemu punkty pomiarowe można było ulokować w miejscach szczególnie wrażliwych na zmianę położenia obciążenia. Trzy przekroje pomiarowe, rozmieszczone w przybliżeniu w jednej czwartej, połowie i trzech czwartych rozpiętości przęsła, utworzyły niezależne bramki pozwalające kilkukrotnie ocenić masę tego samego pojazdu podczas jednego przejazdu. Poprawność przyjętych założeń sprawdzono podczas próbnego obciążenia mostu, obejmującego zarówno schematy statyczne, jak i przejazdy dynamiczne wykonywane pojedynczo oraz w grupach.

Dane uzyskane z badań statycznych były podstawą identyfikacji modelu MES. Autor wykorzystał algorytm genetyczny, a koszt wielokrotnego wykonywania pełnych analiz numerycznych ograniczył przez zastosowanie modelu zastępczego opartego na sieci neuronowej. Proces ten prowadził do takiego doboru zastępczego modułu sprężystości, aby odkształcenia obliczone numerycznie odpowiadały wartościom rejestrowanym przez system pomiarowy SHM. Zachował przy tym właściwą interpretację wyniku, tj.: uzyskana zgodność odpowiedzi nie oznacza jednoznacznego rozpoznania wszystkich rzeczywistych właściwości materiałowych i konstrukcyjnych mostu, lecz potwierdza przydatność zidentyfikowanego modelu w zakresie analiz objętych rozprawą. Model ten wykorzystano dalej do wygenerowania syntetycznego zbioru danych, uwzględniającego różne typy pojazdów, ich masy oraz położenie na obiekcie. Tak przygotowane dane posłużyły do uczenia modeli regresyjnych przewidujących masę pojazdu na podstawie odkształceń konstrukcji. Sygnały pomiarowe poddano wcześniej filtracji za pomocą filtrów Butterwortha, natomiast

architekturę sieci neuronowych dobierano z wykorzystaniem algorytmu optymalizacji rojem cząstek. Powstał w ten sposób logiczny ciąg zależności: wyniki badań eksperymentalnych wykorzystano do identyfikacji modelu MES, model numeryczny dostarczył danych treningowych, a wyuczone na ich podstawie sieci zastosowano do interpretacji sygnałów rejestrowanych podczas rzeczywistego ruchu. Walidację przeprowadzono dla przejazdów pojedynczych, grupowych i losowych, rozpatrując również wpływ prędkości oraz dodatkowych wzbudzeń dynamicznych. Dla przejazdów losowych uzyskano średni bezwzględny błąd procentowy (MAPE) na poziomie około 7–8%, co wskazuje na praktyczną zdolność systemu do szacowania masy całkowitej pojazdów w warunkach objętych badaniami. Wynik ten jest wartościowy, chociaż nie jest uniwersalny, ponieważ jego uogólnienie na inne konstrukcje mostowe wymagałoby odrębnej walidacji, ponieważ geometria mostu M-7L, jego schemat statyczny i sposób rozmieszczenia czujników miały bezpośredni wpływ na przebieg całego procesu identyfikacji.

Wartość rozprawy wynika przede wszystkim z konsekwentnego połączenia badań terenowych, monitoringu konstrukcji, aktualizacji modelu MES i metod uczenia maszynowego w ramach jednego rozwiązania. Oryginalności pracy należy zatem upatrywać głównie w opracowanej metodyce integracji tych składników oraz w jej wdrożeniu na rzeczywistym obiekcie, nie zaś w stworzeniu nowych podstaw algorytmów genetycznych, optymalizacji rojem cząstek czy sieci neuronowych. Praca ma przy tym bardzo wyraźny potencjał aplikacyjny. Informacje o rzeczywistych obciążeniach mogą zostać wykorzystane w dalszych analizach zmęczeniowych, ocenie intensywności użytkowania mostu i zarządzaniu jego eksploatacją, natomiast rozszerzenie systemu o mechanizmy bieżącej aktualizacji modelu na podstawie danych długoterminowych mogłoby przybliżyć przedstawione rozwiązanie do bardziej autonomicznej postaci cyfrowego bliźniaka. Konstrukcja rozprawy pozostaje podporządkowana temu zamierzeniu i prowadzi od analizy obiektu oraz projektu systemu pomiarowego, przez badania doświadczalne i identyfikację modelu, do końcowej implementacji systemu ważenia pojazdów w ruchu.

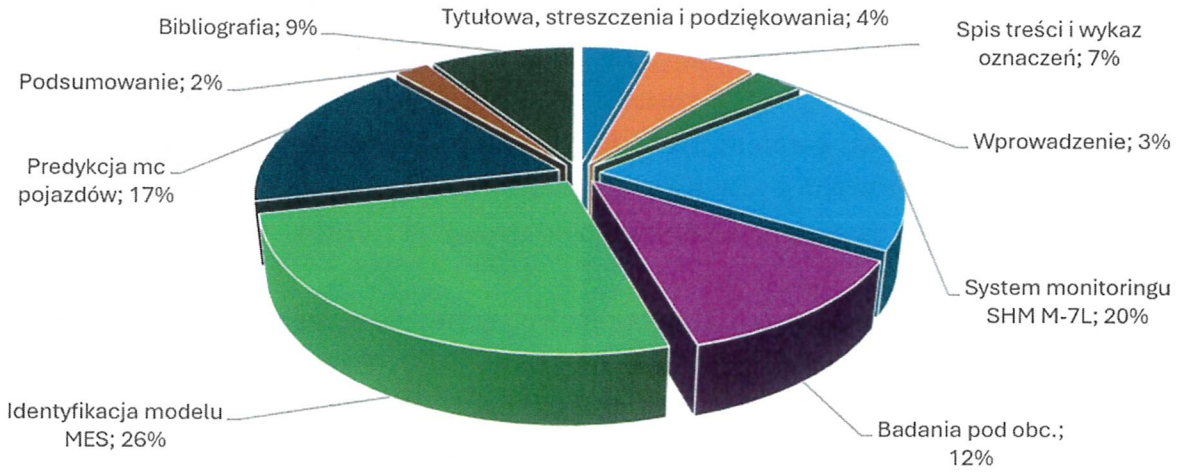
II.2. Charakterystyka rozprawy

Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa ma liniowy układ logiczny, odpowiadający kolejnym etapom budowy cyfrowego bliźniaka mostu M-7L w Wolinie. Autor rozpoczyna od analizy konstrukcji i doboru punktów pomiarowych, następnie wykorzystuje wyniki próbnych obciążeń do identyfikacji modelu MES, który staje się podstawą generowania danych uczących dla modeli służących do szacowania masy pojazdów. Poszczególne części tworzą spójny ciąg zależności, łączący rzeczywisty obiekt, system pomiarowy SHM, model numeryczny i algorytmy uczenia maszynowego. Oryginalność pracy wynika przede wszystkim z integracji tych elementów oraz wdrożenia i walidacji opracowanej metodyki na rzeczywistym moście, nie zaś z opracowania nowych podstaw wykorzystywanych algorytmów. Zakres potwierdzenia wyników pozostaje jednak związany z badanym obiektem i przyjętymi scenariuszami ruchu.

Struktura podziału treści rozprawy

Autor rozprawy dokonał właściwej alokacji materiału przedstawionego w pracy, a rozkład proporcji istotnych elementów przedłożonego materiału pokazano dalej na rysunku.



Taki podział treści pracy nie budzi większych zastrzeżeń i świadczy o przemyślanym podejściu do wielostopniowego rozwiązania postawionego problemu badawczego.

Rozdział 1 pracy – określa podstawy koncepcyjne rozprawy. Autor omawia pojęcie cyfrowego bliźniaka, wskazując na znaczenie przepływu danych pomiędzy rzeczywistą konstrukcją, systemem pomiarowym i jej odwzorowaniem numerycznym. Następnie formułuje cel główny, cztery cele szczegółowe oraz stawia tezę zakładającą, że integracja danych pomiarowych, modelu MES i algorytmów uczenia maszynowego umożliwi identyfikację rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych mostu: ***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***. Rozdział nie ma wydzielonego podsumowania; kończy go krótka prezentacja zakresu rozprawy i kolejności realizowanych etapów badawczych.

Rozdział 2 –przedstawia podstawy projektowania systemów monitorowania konstrukcji, techniki pomiarowe SHM, charakterystykę badanego mostu (opis przypadku) oraz zastosowane światłowodowe czujniki z siatką Bragga. Na podstawie wstępnego modelu MES i wyznaczonych linii wpływu Autor dobiera lokalizację siedemnastu punktów pomiarowych, rozmieszczonych między innymi w trzech niezależnych bramkach. Opisuje także sposób instalacji czujników, rejestracji danych, kompensacji temperatury i oszacowania niepewności pomiarów. Podsumowanie zbiera przesłanki uzasadniające przyjętą konfigurację systemu oraz wskazuje jego rolę jako źródła danych dla dalszych badań i budowy cyfrowego bliźniaka.

Rozdział 3 –obejmuje próby statyczne i dynamiczne przeprowadzone z wykorzystaniem dziewięciu pojazdów ciężarowych różniących się masą, liczbą osi i ich rozstawem. Analizowane są przejazdy pojedyncze, grupowe i losowe, realizowane na obu pasach ruchu, co pozwala sprawdzić odpowiedź konstrukcji w warunkach zbliżonych do rzeczywistej eksploatacji. W podsumowaniu Autor potwierdza poprawność działania systemu SHM, zasadność

lokalizacji czujników oraz lokalny charakter odpowiedzi poprzecznic i globalny charakter pracy wieszaków. Dane z prób statycznych stają się dalszą podstawą identyfikacji modelu MES i przygotowania syntetycznego zbioru uczącego.

Rozdział 4 –zawiera przegląd metod aktualizacji modeli konstrukcji, doboru zmiennych decyzyjnych, funkcji celu oraz modeli zastępczych. W części aplikacyjnej problem identyfikacji zostaje sformułowany jako zadanie optymalizacyjne obejmujące dziewiętnaście zmiennych, rozwiązywane za pomocą algorytmu genetycznego wspomaganego siecią neuronową. Autor analizuje także wrażliwość parametrów i porównuje wyniki modelu pierwotnego z modelem po identyfikacji. W końcowym podsumowaniu wskazuje na zmniejszenie błędu MAPE z 15,65% do 8,41% oraz na ograniczenie kosztu obliczeniowego dzięki zastosowaniu modelu zastępczego.

Rozdział 5 –opisuje końcowy etap opracowanej metodyki, czyli identyfikację obciążeń eksploatacyjnych na podstawie sygnałów z systemu SHM. Przedstawiono sposób filtracji danych, wyznaczania charakterystycznych wartości odkształceń oraz uczenia sieci neuronowych z wykorzystaniem zbioru wygenerowanego przez zidentyfikowany model MES. Walidacja obejmuje przejazdy pojedyncze, grupowe i losowe, a także różne prędkości i dodatkowe wzbudzenia dynamiczne. Rozdział ma dwa podsumowania: pierwsze zestawia wyniki testów, natomiast drugie odnosi skuteczność predykcji, dla przypadków losowych z błędem MAPE około 7–8%, do całej koncepcji cyfrowego bliźniaka. Powoduje to częściowe powtórzenie wniosków.

Rozdział 6 – to podsumowanie s procesu badawczego, łączące część materialną, obejmującą most i badania eksperymentalne, z częścią wirtualną i analityczną, na którą składają się system pomiarowy SHM, model MES oraz algorytmy uczenia maszynowego. Autor uznaje za osiągnięte cele pracy i za potwierdzoną tezę dotyczącą możliwości identyfikacji rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych. Wskazuje także dalsze kierunki badań, przede wszystkim bieżącą aktualizację modelu MES na podstawie długookresowych pomiarów oraz integrację warstwy informacyjnej z modelem BIM i środowiskiem wizualizacyjnym.

Podsumowania rozdziałów 2–5 mają charakter merytoryczny - nie tylko przypominają ich zawartość, ale również formułują wnioski i uzasadniają przejście do kolejnego etapu badań. Pewną niespójność kompozycyjną stanowią brak analogicznego podsumowania rozdziału 1 oraz dwustopniowe, częściowo powtarzające się zakończenie rozdziału 5.

Pracę dopełnia bibliografia (156 pozycji) świadczących o stopniu dopracowania analitycznego i metodycznego rozprawy.

Okres	Liczba	Udział (%)
1970-1979	2	1%
1980-1989	0	0%
1990-1999	1	1%
2000-2009	1	1%
2010-2019	19	12%
2020-2026	133	85%
1970-2026	156	100%

Bibliografia obejmuje 156 publikacji naukowych i 14 dokumentów technicznych. Najliczniej reprezentowane są lata 2025 — 32 pozycje, 2023 — 28 oraz 2022 i 2024 — po 22. Dobór źródeł odpowiada tematyce systemów SHM, czujników światłowodowych, identyfikacji modeli MES, cyfrowych bliźniaków i ważenia pojazdów w ruchu.
Najstarsze przywołania obejmują pracę G. Goble'a, F. Mosesa i A. Pavii z 1976 r., dotyczącą zastosowania systemu pomiarowego na moście, oraz pionierską dla rozwoju technologii Bridge Weigh-in-Motion publikację F. Mosesa z 1979 r. Podstawy wykorzystanych metod optymalizacyjnych reprezentują następnie źródłowa praca J. Kennedy'ego i R. Eberharta z 1995 r., wprowadzająca algorytm optymalizacji rojem cząstek, oraz publikacja K. Deba z 2000 r., poświęcona metodzie obsługi ograniczeń w algorytmach genetycznych. Dominuje literatura współczesna: 133 spośród 156 pozycji zamieszczonych w części „Artykuły naukowe", czyli 85,3%, pochodzi z lat 2020–2026, natomiast 151 pozycji, stanowiących 96,8% tego zbioru, opublikowano w okresie 2012–2026. Szczególnie licznie reprezentowane są lata 2024–2026, z których pochodzi łącznie 61 publikacji. Taka struktura chronologiczna wskazuje na aktualność wykorzystanej literatury w zakresie monitoringu SHM, czujników światłowodowych FBG, identyfikacji modeli MES, cyfrowych bliźniaków oraz zastosowania uczenia maszynowego w systemach ważenia pojazdów w ruchu. W bibliografii uwzględniono również cztery publikacje współautorstwa D. Piotrowskiego, oznaczone numerami [58], [82], [102] i [103], przy czym trzy z nich są bezpośrednio związane z główną problematyką rozprawy, natomiast pozycja [82] dotyczy szerzej rozumianej diagnostyki konstrukcji mostowych. Zastrzeżenia budzi nazwanie ostatniej części bibliografii *„Standardami technicznymi"*. Spośród 14 zamieszczonych w niej pozycji 12 stanowią dokumenty producentów aparatury pomiarowej, jedna jest wytyczną dotyczącą wyznaczania niepewności pomiaru, a jedna krajową oceną techniczną wydaną przez IBDiM, stąd trafniejszą nazwą byłoby np. *Dokumenty techniczne, wytyczne i oceny technicznej*.

III. Ocena rozprawy

Przedstawiona rozprawa stanowi interdyscyplinarne studium łączące zagadnienia monitorowania stanu konstrukcji mostowych, modelowania numerycznego, badań eksperymentalnych, optymalizacji oraz uczenia maszynowego. Jej zasadniczą podstawę tworzą: projekt systemu akwizycji danych SHM dla mostu łukowego M-7L w Wolinie, wykorzystanie światłowodowych czujników odkształceń z siatką Bragga, analiza odpowiedzi konstrukcji metodą elementów skończonych, badania statyczne i dynamiczne pod próbnym obciążeniem, identyfikacja parametrów modelu MES za pomocą algorytmu genetycznego i zastępczego modelu sieci neuronowej, a następnie przetwarzanie sygnałów oraz predykcja masy pojazdów. Praca łączy mechanikę konstrukcji z metrologią, analizą danych i metodami sztucznej inteligencji, prowadząc do praktycznej realizacji systemu ważenia pojazdów w ruchu, potraktowanego jako element warstwy informacyjnej cyfrowego bliźniaka rzeczywistego obiektu mostowego.

W części eksperymentalnej Autor przeprowadza badania statyczne i dynamiczne z wykorzystaniem dziewięciu pojazdów ciężarowych, obejmujące przejazdy pojedyncze, grupowe i losowe. Wyniki potwierdzają zasadność rozmieszczenia punktów pomiarowych oraz

wykazują lokalny charakter odpowiedzi poprzecznic i globalny charakter pracy wieszaków. Pozwala to powiązać zachowanie poszczególnych elementów konstrukcji z położeniem obciążenia na długości i szerokości jezdni, tworząc fizyczną podstawę późniejszej identyfikacji masy pojazdów. Autor wykracza poza typowe wykorzystanie systemu SHM jako narzędzia służącego jedynie do rejestracji i sygnalizowania zmian odpowiedzi konstrukcji. Dane pomiarowe zostają tutaj powiązane z modelem numerycznym oraz algorytmami analitycznymi, dzięki czemu system może być wykorzystany również do identyfikacji rzeczywistych oddziaływań eksploatacyjnych.

W warstwie numerycznej praca podejmuje złożone zagadnienie identyfikacji modelu MES na podstawie wyników próbnego obciążenia. Proces ten sformułowano jako zadanie optymalizacyjne obejmujące dziewiętnaście zmiennych decyzyjnych i funkcję celu opisującą rozbieżności między odkształceniami zmierzonymi a obliczonymi. Zastosowanie algorytmu genetycznego, wspomaganego zastępczym modelem sieci neuronowej, umożliwiło analizę znacznej liczby wariantów bez konieczności każdorazowego wykonywania kosztownych obliczeń MES. Uzyskany model wykazał lepszą zgodność z wynikami eksperymentalnymi niż model pierwotny, co potwierdziło celowość przeprowadzonej identyfikacji.

Interdyscyplinarny charakter rozprawy jest szczególnie widoczny w połączeniu mechaniki konstrukcji z przetwarzaniem sygnałów i uczeniem maszynowym. Autor wykorzystuje filtr Butterwortha oraz średnią kroczącą do wyodrębnienia składowej odpowiedzi związanej z przejazdem pojazdu, a następnie stosuje sieci neuronowe do predykcji jego masy całkowitej. Zidentyfikowany model MES służy przy tym do wygenerowania syntetycznego zbioru treningowego, ograniczając potrzebę prowadzenia rozbudowanych i kosztownych badań eksperymentalnych.

Zwieńczeniem pracy jest jej wymiar aplikacyjny, wyrażony przez opracowanie i weryfikację systemu ważenia pojazdów wykorzystującego trzy niezależne bramki pomiarowe. W najbardziej złożonych scenariuszach przejazdów losowych uzyskano średni błąd MAPE wynoszący około 7–8%, natomiast dodatkowe próby nie wykazały jednoznacznego wpływu prędkości ani dodatkowego wzbudzenia dynamicznego na jakość predykcji.

Uzyskane wyniki potwierdzają potencjał aplikacyjny metodyki łączącej badania eksperymentalne, modelowanie numeryczne i analizę danych. Szczególnie wysoko oceniam jej wdrożenie i walidację na rzeczywistym moście. Dalszych prac wymagają bieżąca aktualizacja modelu oraz jego integracja z BIM i środowiskiem wizualizacyjnym.

III.1. Uwagi ogólne

Praca napisana jest w przeważającej części językiem technicznym, z bardzo dużą dbałością o szczegóły edycyjne, niemniej jednak nasuwa się kilka niżej przedstawionych uwag.

1) Status rozwiązania jako cyfrowego bliźniaka wymaga pełniejszego uzasadnienia. System integruje SHM, model MES i algorytmy predykcyjne, lecz przepływ danych odbywa się głównie od obiektu do modelu cyfrowego. Brak bieżącej aktualizacji MES i automatycznego sprzężenia zwrotnego z procesem utrzymania zbliża rozwiązanie do zaawansowanego systemu SHM/BWIM lub cyfrowego cienia.

2) Oryginalność naukowa nie została wyraźnie oddzielona od wartości integracyjnej i wdrożeniowej. Zastosowane metody są znane, natomiast osiągnięciem Autora jest ich połączenie i wdrożenie na rzeczywistym moście, stąd należałoby jednoznacznie wskazać nowe wyniki, autorskie modyfikacje oraz elementy stanowiące aplikację istniejących metod.
3) Zastrzeżenia budzi identyfikowalność parametrów modelu MES. Autor wyznacza 19 parametrów na podstawie 31 wartości odpowiedzi konstrukcji, nie analizując jednak jednoznaczności otrzymanego rozwiązania, wzajemnych korelacji między parametrami ani uwarunkowania problemu identyfikacyjnego. Niewielka wartość funkcji celu świadczy o dobrym dopasowaniu odpowiedzi modelu do wyników pomiarów (jednoznaczność zestawu parametrów i ich bezpośrednie znaczenie fizyczne).
4) Walidację modelu predykcyjnego przeprowadzono na dziewięciu pojazdach o masach około 27,8–41,5 t, których układy osi wykorzystano wcześniej do generowania danych syntetycznych. Nie jest ona zatem całkowicie niezależna, a wyników nie należy bez dalszych badań uogólniać na samochody lekkie, autobusy, nietypowe zestawy osiowe i pojazdy ponadnormatywne.
5) Nie przedstawiono pełnej analizy niepewności całego procesu. Oszacowanej niepewności pomiaru odkształceń nie propagowano przez identyfikację MES, generowanie danych syntetycznych i model neuronowy. Punktowe wyniki BWIM, pozbawione przedziałów predykcji, mają ograniczoną przydatność w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych.
6) W tak licznym materiale graficznym i tabelarycznym, przydałyby się spisy tabel i rysunków, w celu łatwiejszej nawigacji w treści pracy.

III.2. Uwagi szczegółowe

Poniżej przedstawiono listę uwag szczegółowych.

1. S. 21–24. Przegląd definicji cyfrowego bliźniaka jest krótki i selektywny. Nie omówiono rozróżnienia pomiędzy *Digital Model*, *Digital Shadow* i *Digital Twin*, opartego na kierunku oraz automatyzacji przepływu danych. Brak kryteriów pozwalających jednoznacznie wykazać, które poziomów integracji osiągnięto. Zadeklarowano dwukierunkową relację i wzajemne oddziaływanie modelu rzeczywistego i wirtualnego, ale z opisu wynika, że model MES wykorzystano do projektowania systemu, następnie pomiary posłużyły do jednorazowej identyfikacji modelu, a na końcu sieć neuronowa przetwarza dane pomiarowe. Stąd odnoszę wrażenie, iż twierdzenie o zrealizowanej dwukierunkowości może być zbyt daleko idące.
2. S. 24 i 44–49. Rozmieszczenie czujników oparto na analizie linii wpływu i przyjętych przekrojach pomiarowych. Nie zdefiniowano miary informacji, funkcji celu ani wariantów konkurencyjnych, dlatego właściwsze jest określenie „racjonalny dobór lokalizacji" niż „optymalizacja systemu pomiarowego".
3. S. 37 i 41. W opisie konstrukcji płyty prefabrykowane przypisano do betonu C50/60, a część monolityczną do C40/50. W modelu MES klasy te przypisano odwrotnie. Rozbieżność wymaga jednoznacznego wyjaśnienia.

4. Opis modelu MES, s. 41–43. Opis modelu MES nie zawiera pełnych danych dotyczących siatki, liczby elementów, podparcia, modelowania łożysk, podatności połączeń i sił wstępnych w wieszakach. Nie oceniono też wpływu uproszczeń na wyniki identyfikacji.
5. Wykaz oznaczeń, s. 14, oraz wzory 2-1 i 2-2, s. 50–51. Wielkości λ i λ_0 opisano jako długości fali Bragga, ale przypisano im jednostkę μm/m. Długość fali jest w dalszym tekście wyrażana w nanometrach. Ponadto należałoby rozróżnić długości fal czujnika odkształcenia i czujnika temperatury. Warto też zweryfikować zapis na str. 50 - k=0,7 ± 0,4 dla czujników FS62RSS, ponieważ podana niepewność jest wyjątkowo duża w stosunku do wartości współczynnika.
6. Budżet niepewności, s. 58–60. Podano względną niepewność rozszerzoną 4,70%, nie wykazując udziału jej składowych ani punktu pomiarowego i przypadku obciążenia, których dotyczy. Przyjęcie jednej wartości dla wszystkich 17 punktów wymaga uzasadnienia ze względu na różnice lokalnych linii wpływu.
7. Tabela 3.4, s. 66. Pojazdy nr 8 i 9 określono jako trójosiowe, natomiast zapisano dla nich siły $F_1 = F_2$oraz $F_3 = F_4$, co odpowiada czterem osiom.
8. Identyfikacja MES, s. 96–102 i 129–132. Nie wykazano identyfikowalności 19 parametrów ani nie podano ich końcowego wektora. Funkcja celu pomija niepewność pomiarową, jakość kanałów i regularyzację, co stwarza wrażenie ograniczenia interpretacji i powtarzalności wyników.
9. Model zastępczy, s. 107–132. Walidacja na danych pochodzących wyłącznie z MES potwierdza dokładność jego aproksymacji, a nie zgodność sieci z rzeczywistą konstrukcją, nie wykazano również dokładności modelu w sąsiedztwie optimum ani korzyści czasowych z uwzględnieniem kosztu wygenerowania danych.
10. Filtracja, s. 142–162. Nie uzasadniono parametrów filtru ani nie oceniono jego wpływu na amplitudę sygnału. Zastosowanie nieprzyczynowej funkcji *sosfiltfilt* wymaga doprecyzowania deklaracji działania w czasie rzeczywistym.
11. Odnalezione szczegóły:

- w Tabeli 5.4, przypadek 1, średnia z dodatnich wartości MPE 0,49% i 8,95% powinna wynosić $+4{,}72\%$, a nie $-4{,}72\%$;
- na s. 158 (2 akapit) wartość MAPE określono jako 6,97%, podczas gdy w Tabeli 5.6 podano 6,98%;
- stosowane jest określenie „Tablica 5.6", mimo konsekwentnego używania w pracy terminu „Tabela";
- potknięcia językowe, m.in. „tą tematykę"(29), „zwiększenia skuteczność"(98), „skracają czasu"(115) i „w kolejnych korkach"(120);
- bibliografia – występują drobne literówki: [100] jest „Optical and Quantium Electronics" zamiast „Optical and Quantum Electronics"; [128] jest „model udating"; [151] jest „reinforced conrete" zamiast „reinforced concrete".

Podsumowanie uwag

Przedstawione uwagi mają przede wszystkim charakter doprecyzowujący i dyskusyjny. Proszę Autora o odniesienie się do nich, aby umożliwić jednoznaczny odbiór przyjętych założeń, zastosowanych metod i uzyskanych wyników, zgodny z zamierzeniem Autora.

Uwagi te nie obniżają zasadniczo wartości merytorycznej rozprawy Pana mgr. inż. Dawida Piotrowskiego ani jej wysokiej oceny. Praca obejmuje obszerny i wartościowy materiał badawczy, a jej mocną stroną jest konsekwentne połączenie badań terenowych, monitoringu konstrukcji, modelowania MES, metod optymalizacyjnych i uczenia maszynowego. Rozprawa przedstawia oryginalne rozwiązanie podjętego problemu badawczego, wykorzystujące współczesne metody analityczne i numeryczne, a sformułowane zadania zostały rozwiązane w sposób odpowiadający aktualnemu stanowi wiedzy. Na szczególne podkreślenie zasługują zakres przeprowadzonych badań, ich osadzenie w rzeczywistym obiekcie mostowym oraz praktyczna użyteczność opracowanego rozwiązania.

IV. Osiągnięcia pracy

W mojej ocenie oceniana rozprawa posiada walory poznawcze i praktyczne, a podjęta w niej problematyka ma charakter w pełni dysertabilny. Tematyka pracy pozostaje w ścisłym związku z realnym i aktualnym problemem badawczym, którego rozwiązanie przyczynia się do usprawnienia działań automatyzujących monitorowanie stanu konstrukcji mostowych. Autor wykazał się zdolnością do samodzielnego prowadzenia badań naukowych, właściwie dobierając i łącząc metody analizy, obserwacji oraz modelowania w celu rozwiązania zidentyfikowanego problemu i opisu towarzyszących mu zjawisk.

Główny cel rozprawy, którym było zbadanie możliwości budowy cyfrowego bliźniaka obiektu mostowego służącego do rekonstrukcji rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych, został osiągnięty. Autor opracował i zweryfikował na rzeczywistym moście metodykę integrującą dane z systemu monitoringu SHM, zidentyfikowany model MES oraz algorytmy uczenia maszynowego.

Zrealizowano również cele szczegółowe. Na podstawie analiz statycznych i linii wpływu wyznaczono rozmieszczenie punktów pomiarowych, ograniczając liczbę czujników przy zachowaniu informacji potrzebnych do identyfikacji obciążenia. Przeprowadzono badania statyczne i dynamiczne z wykorzystaniem dziewięciu pojazdów, potwierdzając zależność odpowiedzi konstrukcji od położenia i sposobu przejazdu. Następnie przeprowadzono identyfikację modelu MES, zmniejszając wartość MAPE z 15,65% do 8,41%, a uzyskany model wykorzystano do wygenerowania syntetycznych zbiorów uczących. Ostatni cel osiągnięto przez opracowanie i walidację modeli predykcyjnych, dla których w złożonych scenariuszach ruchu uzyskano średni błąd MAPE wynoszący około 7–8%.

Wyniki pozwalają uznać tezę rozprawy za potwierdzoną w zakresie przeprowadzonych badań. Wykazano bowiem, że połączenie danych pomiarowych, modelu numerycznego i metod uczenia maszynowego umożliwia identyfikację rzeczywistych obciążeń eksploatacyjnych. Wniosek ten odnosi się bezpośrednio do badanego mostu, przyjętych typów pojazdów oraz zweryfikowanych scenariuszy ruchu.

Najważniejsze osiągnięcia przedstawionej rozprawy doktorskiej obejmują:

1. Główną nowością rozprawy jest metodyka budowy cyfrowego bliźniaka, integrująca system SHM, identyfikację modelu MES, algorytmy optymalizacyjne i uczenie maszynowe. Racjonalnie dobrano liczbę czujników, a zidentyfikowany model MES wykorzystano do

generowania danych syntetycznych, ograniczając zakres kosztownych badań eksperymentalnych.

2. Zastosowanie trzech niezależnych bramek pomiarowych umożliwia uzyskanie trzech oszacowań masy podczas jednego przejazdu. Pozwala to na wzajemną kontrolę wyników oraz wykrywanie wartości odstających i nieprawidłowego działania czujników.
3. Rozwiązanie zwalidowano na rzeczywistym moście, uwzględniając przejazdy pojedyncze, grupowe i losowe. Metoda zachowała dobrą dokładność identyfikacji masy również w złożonych warunkach ruchu, a badania nie wykazały istotnego wpływu prędkości ani dodatkowych wzbudzeń dynamicznych na jakość predykcji.

IV. Wnioski końcowe

Rozprawa podejmuje aktualną problematykę cyfrowych bliźniaków mostów, a jej głównym osiągnięciem jest opracowanie i zweryfikowanie na moście M-7L w Wolinie metodyki integrującej system SHM, badania eksperymentalne, identyfikację modelu MES oraz uczenie maszynowe do ważenia pojazdów w ruchu. Oryginalność pracy wynika z przemyślanego połączenia znanych metod i ich wdrożenia na rzeczywistym obiekcie. Przedstawiony system nie obejmuje jeszcze w pełni dwukierunkowej wymiany informacji, stanowi jednak wartościową podstawę do dalszego rozwoju cyfrowego bliźniaka i nie umniejsza to znaczenia już osiągniętych wyników.

Rozprawa potwierdza dojrzałość naukową Autora oraz wysoki poziom jego warsztatu badawczego, niosąc również istotną wartość poznawczą i aplikacyjną. Rozprawa w pełni spełnia wymagania stawiane dysertacjom doktorskim w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport. Została starannie przygotowana, ma logiczną i czytelną strukturę, a uzyskane wyniki potwierdzają wysoką skuteczność opracowanego rozwiązania. Wysoka wartość naukowa i aplikacyjna pracy, kompleksowy zakres badań oraz skuteczna integracja technik SHM, MES i uczenia maszynowego stanowią jednoznaczną podstawę do **wystąpienia z wnioskiem o jej wyróżnienie.**

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. **Dawida Piotrowskiego pt. „Implementacja algorytmów optymalizacyjnych i technik sztucznej inteligencji w procesie tworzenia cyfrowych bliźniaków obiektów mostowych"** spełnia wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich stawiane obowiązującą Ustawą z dn. 20.07.2018 roku *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2024 r., poz. 1571 z późn. zm.) i **wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.**

Recenzję podpisał
Jarosław Korzeb