

Prof. dr hab. inż. Jan Bień
Politechnika Wroclawska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Mostów i Kolei
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
Tel.: 71 320 2356
E-mail: jan.bien@pwr.edu.pl



Politechnika
Wroclawska

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGRA INŻ. GRZEGORZA POPRAWY PT. „OPERACYJNA ANALIZA MODALNA W BADANIACH KRATOWYCH MOSTÓW KOLEJOWYCH POD PRÓBNYM OBCIĄŻENIEM DYNAMICZNYM

1. Podstawa formalna i przedmiot recenzji

Niniejsza recenzja została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej – Pani dr hab. inż. Joanny Bzówki, prof. Politechniki Śląskiej – wyrażoną w piśmie nr RB-0/4020/17/18 z dnia 26 kwietnia 2018 r.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Grzegorza Poprawy pt. „Operacyjna analiza modalna w badaniach kratowych mostów kolejowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym”, opracowana na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej, pod kierunkiem Pana dra hab. inż. Marka Salamaka, prof. Politechniki Śląskiej – jako promotora oraz dra inż. Stefana Pradeloka – jako promotora pomocniczego. W początkowym okresie (do sierpnia 2017 roku) prace nad rozprawą doktorską były prowadzone pod promotorską opieką dra hab. inż. Jerzego Weselega, prof. Politechniki Śląskiej.

Opiniowana rozprawa doktorska została przedstawiona w formie zwartego wydruku formatu A4, firmowanego przez Katedrę Mechaniki i Mostów Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Praca jest datowana na rok 2018.

W związku z otwarciem przewodu doktorskiego w dniu 18 września 2013 roku podstawę prawną recenzji stanowią:

- a) Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.),
- b) Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. Nr 204 z dnia 28 września 2011 r., poz. 1200).

2. Tematyka, tytuł, układ i forma rozprawy

Tematyka opiniowanej rozprawy dotyczy zagadnień identyfikacji właściwości dynamicznych kolejowych obiektów mostowych. Szczególną uwagę poświęcono możliwościom wykorzystania operacyjnej analizy modalnej w badaniach kratowych przeseł mostowych pod obciążeniami dynamicznymi. Podjęta tematyka badawcza wynika z aktualnych potrzeb inżynierii mostowej w zakresie zwiększenia dokładności numerycznych

Wpłynęło dnia: 24 maja 2018 r.

modeli obiektów mostowych wykorzystywanych w procesie ich projektowania oraz analiz niezbędnych w zarządzaniu infrastrukturą mostową, a także potrzeb w dziedzinie precyzyjnej doświadczalnej identyfikacji cech dynamicznych konstrukcji (częstotliwości i postaci drgań oraz tłumienie). Charakterystyki dynamiczne określone w wyniku badań przeprowadzonych przed oddaniem obiektów do eksploatacji są bardzo cenną informacją, która może – i powinna – być wykorzystywana do oceny zmian stanu konstrukcji w wyniku procesów degradacyjnych, a w efekcie do skutecznego zarządzania utrzymaniem i eksploatacją infrastruktury mostowej. Waga rozpatrywanego problemu wzrasta wraz ze zwiększaniem prędkości ruchu pojazdów trakcyjnych i wynikającą z tego intensyfikacją efektów dynamicznych.

Procedury standardowo stosowane obecnie w ramach próbnych obciążeń dynamicznych kolejowych przeseł mostowych, a także ich badań pod obciążeniami eksploatacyjnymi, są przeważnie oparte na klasycznych metodach spektralnej analizy sygnałów, co w przypadku bardziej złożonych konstrukcji może nie gwarantować dostatecznie precyzyjnego określenia dynamicznych cech obiektu. Podjętą przez Doktoranta próbę rozwiązania przedstawionego wyżej złożonego zagadnienia przy użyciu metod operacyjnej analizy modalnej (OMA) w odniesieniu do kolejowych przeseł mostowych o dźwigarach kratownicowych – na podstawie wyników własnych badań doświadczalnych i analiz symulacyjnych – uważam za działanie ważne zarówno z poznawczego, jak i technicznego punktu widzenia.

W świetle powyższych uwag stwierdzam, że tematyka recenzowanej rozprawy doktorskiej została trafnie dobrana, rozpatrywany problem naukowy jest interesujący od strony poznawczej, a jednocześnie posiada bezpośrednie odniesienia praktyczne. Podjęta problematyka nabiera szczególnego znaczenia w świetle odbywającej się szerokiej modernizacji sieci kolejowej w naszym kraju, prowadzącej do zdecydowanego zwiększenia prędkości ruchu taboru kolejowego, a więc i wzrostu znaczenia zagadnień dynamicznych w analizie i ocenie kolejowych obiektów inżynierskich.

Tytuł pracy „*Operacyjna analiza modalna w badaniach kratowych mostów kolejowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym*” wymaga krótkiego komentarza. Użyte w tytule określenie „próbnе obciążenie dynamiczne” jest w rozprawie specyficznie zdefiniowane (patrz *Słowniczek podstawowych pojęć*) jako „szereg działań doświadczalnych zmierzających do opisanie cech dynamicznych badanej konstrukcji”. W świetle norm i innych przepisów powołanych w rozprawie oraz w niektórych miejscach opracowania (patrz np. podrozdział 2.1) próbnе obciążenie dynamiczne jest rozumiane jako badanie przy wymuszeniach o znanych wartościach, generowanych najczęściej przez pojazdy o określonych i kontrolowanych parametrach. W wielu miejscach pracy Doktorant słusznie podkreśla, że operacyjna analiza modalna (która jest głównym tematem pracy) nie wymaga znajomości wartości wymuszeń, a wręcz wykorzystywanie innych wymuszeń drgań niż pojazdy poruszające się po obiekcie jest bardziej korzystne. Podsumowując uważam, że najbardziej reprezentatywny dla zawartości pracy byłby tytuł: „*Operacyjna analiza modalna w badaniach kratowych mostów kolejowych pod obciążeniami dynamicznymi*”.

Recenzowana praca doktorska liczy 202 numerowane strony formatu A4 tekstu podstawowego – podzielonego na 7 rozdziałów, który jest uzupełniony 1-stronicowymi *Streszczeniami* w języku polskim i angielskim, *Spisem akronimów* (1 strona) oraz *Słowniczkiem podstawowych pojęć* (2 strony), a także *Załącznikiem A: Dobre praktyki eksperymentalne w Operacyjnej Analizie Modalnej mostów kolejowych* (5 stron) oraz *Bibliografią* przedstawioną na 10 stronach. W tekście pracy zamieszczono 172 rysunki oraz 19 tablic.

W liczącym 5 stron rozdziale 1. *Wprowadzenie* zaprezentowano ogólną charakterystykę podejmowanego zadania naukowego na tle aktualnie stosowanych metod badawczych.

Sformułowano podstawowe cele i zakres pracy, a także przedstawiono układ rozprawy. Sformułowany we *Wprowadzeniu* główny cel rozprawy doktorskiej: „Adaptacja operacyjnej analizy modalnej jako narzędzia identyfikacyjnego do specyficznych warunków sterowanego eksperymentu identyfikacyjnego wykonywanego na kolejowych mostach kratowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym” trafnie ujmuje istotę podjętych prac naukowo-badawczych.

W rozdziale 2. pod tytułem *Badania kolejowych mostów kratowych pod obciążeniem dynamicznym* na 22 stronach zaprezentowano przegląd aktualnego stanu wiedzy w zakresie próbnych obciążeń dynamicznych obiektów mostowych. Szczególną uwagę zwrócono na sposoby realizacji tego typu badań w świetle obowiązujących przepisów. Przedstawiono wybrane prace poświęcone doświadczalnym badaniom dynamicznym rozpatrywanej klasy obiektów, a także krajowe i wybrane międzynarodowe przepisy oraz zalecenia w zakresie dynamicznej analizy kolejowych obiektów mostowych. W końcowej części rozdziału scharakteryzowano kolejowe przęsła mostowe o kratownicowych dźwigarach głównych – stanowiące główny przedmiot badań prezentowanych w rozprawie. Przedstawiono propozycję systematyki tego typu konstrukcji oraz specyficzne zagadnienia związane z ich badaniami pod obciążeniami dynamicznymi.

W rozdziale 3. zatytułowanym *Operacyjna analiza modalna w inżynierii budowlanej* (42 str.) przedstawiono podstawy operacyjnej analizy modalnej na tle metod teoretycznej i doświadczalnej analizy modalnej, przytoczono przykłady zastosowań doświadczalnej analizy modalnej do badań obiektów mostowych. Szczegółowo omówiono metodykę operacyjnej analizy modalnej oraz scharakteryzowano podstawowe techniki badawcze związane z tą metodą, a wykorzystywane przez Doktoranta w dalszej części rozprawy.

Rozdział 4. pod nazwą *Eksperyment identyfikacyjny na kolejowych mostach kratowych* liczy 54 strony i zawiera opis stosowanej przez Doktoranta metodyki przygotowania i realizacji badań obiektów mostowych pod obciążeniami dynamicznymi. Proponowane procedury w zakresie definiowania celów badań, wyboru punktów pomiarowych i referencyjnych, konfiguracji sprzętu pomiarowego oraz przebiegu procesów pomiarowych przedstawiono na przykładzie kratownicowych przęseł trzech kolejowych obiektów mostowych – wybranych z bogatego dorobku badawczego Doktoranta.

W rozdziale 5. *Identyfikacja modeli modalnych mostów kratowych* (47 str.) przedstawiono proponowaną przez Doktoranta metodykę identyfikacji cech dynamicznych oraz sposobów walidacji i weryfikacji wyników badań doświadczalnych z wykorzystaniem narzędzi teoretycznej analizy modalnej w postaci analiz numerycznych. Opracowaną metodykę zaprezentowano na przykładzie trzech przęseł kratownicowych, których badania opisano w rozdziale 4. W końcowej części rozdziału sformułowano ogólne wnioski dotyczące odpowiedzi przęseł kratownicowych na obciążenia dynamiczne, a także oryginalne zalecenia dotyczące modelowania przęseł kratownicowych na potrzeby analiz dynamicznych oraz sposobów wykorzystywania wyników badań doświadczalnych.

W rozdziale 6. zatytułowanym *Przykłady badań konstrukcji mostowych innych typów* (23 str.) przedstawiono krótkie 1-stronicowe charakterystyki badań dynamicznych przeprowadzonych z udziałem Doktoranta w odniesieniu do 14 obiektów mostowych o dźwigarach głównych innych niż kratownicowe. Dla każdego obiektu przedstawiono w ujednocionej formie: cel badań, rodzaj wymuszenia, opis konstrukcji i przebiegu eksperymentu oraz podstawowe wnioski. W ostatniej części rozdziału sformułowano ogólne wnioski dotyczące stosowania operacyjnej analizy modalnej w mostownictwie oraz zwrócono uwagę na podstawowe zalety tej metody, jak również na zagrożenia związane z jej stosowaniem.

W ostatnim rozdziale *Podsumowanie* na 4 stronach przedstawiono syntetyczne zestawienie rezultatów prac przeprowadzonych przez Doktoranta oraz wniosków wynikających z uzyskanych wyników. Zarysowano także proponowane kierunki dalszych prac naukowo-badawczych związanych z analizowanym problemem.

W *Załączniku A: Dobre praktyki eksperymentalne w Operacyjnej Analizie Modalnej mostów kolejowych* (5 stron) zawarto oryginalną propozycję Doktoranta w zakresie formalizacji procedur wykorzystywania operacyjnej analizy modalnej w badaniach dynamicznych kolejowych obiektów mostowych.

Rozprawę zamyka *Bibliografia* obejmująca 147 publikacji oraz 10 przepisów i norm. Współautorem 4 publikacji zamieszczonych w zestawieniu jest Doktorant. W *Bibliografii* przedstawiono głównie prace z okresu ostatnich 15-20 lat, ale uwzględniono także ważniejsze opracowania z lat wcześniejszych. Dobór źródeł literaturowych świadczy o dobrym rozeznaniu Doktoranta w problematyce stanowiącej przedmiot dysertacji.

Podsumowując należy stwierdzić, że podział rozprawy na rozdziały oraz ich kolejność są logicznie uzasadnione i konsekwentnie dokumentują realizację założonych celów.

Pod względem edytorskim rozprawa jest starannie opracowana. Na szczególne podkreślenie zasługuje poprawność językowa, w tym konsekwencja w stosowaniu terminologii technicznej. Zamieszczone liczne ilustracje graficzne (172 rysunki!) oraz tablice są czytelne i komunikatywne. Dobrym pomysłem są krótkie streszczenia umieszczone na początku każdego rozdziału, które ułatwiają zrozumienie koncepcji i układu pracy, a także podsumowania znajdujące się na końcach rozdziałów – zawierające wnioski i opinie Doktoranta.

Ważniejsze uwagi szczegółowe dotyczące formy opracowania zamieściłem w punkcie 4. recenzji.

3. Merytoryczna ocena rozprawy

Pod względem merytorycznym recenzowaną pracę doktorską Pana mgra inż. Grzegorza Poprawy ogólnie oceniam bardzo pozytywnie. O jej znacznej wartości merytorycznej decydują następujące cechy:

- a) Tematyka rozprawy została właściwie dobrana – jest ciekawa z poznawczego punktu widzenia, wymaga kompleksowego podejścia, a rozwiązywane zagadnienie naukowe jest powiązane z potrzebami praktyki inżynierskiej.
- b) Doktorant zaprezentował dobre rozeznanie stanu wiedzy w obszarze stanowiącym przedmiot rozprawy, wykazał dużą kreatywność w planowaniu i przeprowadzaniu badań doświadczalnych obiektów mostowych oraz biegłość w modelowaniu i numerycznej analizie konstrukcji. Dowiódł także dużej sprawności, wnikliwości oraz dociekliwości w interpretacji, analizie i ocenie uzyskanych wyników zarówno badań doświadczalnych, jak i analiz teoretycznych.
- c) Wszystkie cele pracy doktorskiej sformułowane w rozdziale 1.2 zostały osiągnięte.
- d) Za najważniejsze oryginalne elementy rozprawy doktorskiej Pana mgra inż. Grzegorza Poprawy uważam:
 - Porównawczy przegląd metod teoretycznej i doświadczalnej analizy modalnej analizy obiektów mostowych pod obciążeniami dynamicznymi wykonany na podstawie bogatego zestawu specjalistycznej literatury.
 - Opracowanie i wdrożenie do praktyki badawczej efektywnej metodyki identyfikacji parametrów dynamicznych obiektów mostowych z wykorzystaniem operacyjnej analizy modalnej.

- Zaplanowanie i przeprowadzenie badań doświadczalnych wybranych 3 kolejowych przęseł mostowych o kratownicowych dźwigarach głównych oraz dokonanie identyfikacji ich parametrów modalnych z wykorzystaniem metodyki zaproponowanej w rozprawie.
- Dokonanie krytycznej analizy porównawczej uzyskanych wyników badań doświadczalnych i obliczeń teoretycznych, ze szczególnym uwzględnieniem identyfikacji specyficznych cech dynamicznego zachowania się konstrukcji przęseł o dźwigarach kratownicowych.
- Opracowanie propozycji kompleksowych zaleceń dotyczących stosowania operacyjnej analizy modalnej w badaniach kolejowych obiektów mostowych (patrz *Załącznik A*).

Na podkreślenie i pochwałę zasługuje uwieńczone sukcesem dążenie Doktoranta do harmonijnego łączenia teoretycznych i doświadczalnych metod badawczych w poszukiwaniu rozwiązań analizowanego problemu naukowego. Wysoko oceniam także jasne i precyzyjne formułowanie przyjmowanych założeń upraszczających oraz dociekliwość w interpretacji wyników, co świadczy o zrozumieniu przez Doktoranta złożoności rozpatrywanych zagadnień, a jednocześnie ułatwia śledzenie prezentowanych rozwiązań.

Zaletą recenzowanej pracy jest także umiejętne uogólnianie i transformacja rezultatów prac naukowo-badawczych do postaci konkretnych zaleceń i procedur ukierunkowanych na efektywne wykorzystywanie operacyjnej analizy modalnej w badaniach obiektów mostowych.

Pracę doktorską uzupełnia publikacyjny dorobek Doktoranta w dziedzinie związanej z tematyką dysertacji. W bibliografii rozprawy wymieniono 4 publikacje, których współautorem jest Doktorant, w tym: 2 publikacje w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym oraz 2 w materiałach konferencji o zasięgu międzynarodowym.

Do recenzowanej rozprawy doktorskiej zgłaszam następujące uwagi i komentarze:

- a) Sformułowane w rozdziale 1. cele i zakres pracy są jasno określone i logicznie wynikają ze stanu badań obiektów mostowych pod obciążeniami dynamicznymi – szczegółowo przedstawionego w rozdziale 2.
- b) W rozdziale 3. kompleksowo przedstawiono opis operacyjnej analizy modalnej w zastosowaniu do badań konstrukcji – na tle innych metod analizy modalnej. Podkreślono specyficzne cechy tej metody i zaprezentowano jej podstawowe techniki badawcze – z odwołaniami do literatury przedmiotu. Doktorant nie proponuje w tym zakresie własnych rozwiązań, a na podkreślenie zasługuje kompleksowe przedstawienie podstawowych technik stosowanych w operacyjnej analizie modalnej.
- c) W odniesieniu do przedstawionych badań terenowych (rozdział 4. oraz 5.) pewne zdziwienie budzi brak pomiaru drgań w strefach podporowych rozpatrywanych konstrukcji przęseł. Wyniki pomiarów drgań w miejscach podparcia przęseł pozwoliłyby na pełniejsze poznanie analizowanego zagadnienia i bardziej precyzyjną interpretację uzyskanych wyników. Uwaga na ten temat zamieszczona na str. 169 świadczy jednak o tym, że Doktorant zdaje sobie sprawę z wagi tego zagadnienia.
- d) Zamieszczone w rozdziale 6. przykłady zastosowań operacyjnej analizy modalnej do badań konstrukcji mostowych innych niż przęsła kratownicowe zaprezentowano jedynie w formie opisowej, bez podania choćby wybranych wyników. Można domyślać się, że powodem może być i tak znaczna objętość rozprawy. Jeżeli wyniki tych badań były publikowane to można było podać odniesienia do literatury, a jeżeli

nie były – to zachęcam do ich prezentacji, nawet w sytuacji braku pełnej satysfakcji z rezultatów. Rzetelny opis i analiza przyczyn problemów mogą być informacjami cennymi dla innych badaczy.

- e) W Załączniku A: *Dobre praktyki eksperymentalne w Operacyjnej Analizie Modalnej mostów kolejowych* sformułowano kompleksowe zalecenia dotyczące stosowania operacyjnej analizy modalnej w badaniach kolejowych obiektów mostowych. Zalecenia te znajdują uzasadnienie w pozostałej części rozprawy i powinny stać się podstawą dyskusji na temat metodyki badań konstrukcji mostowych pod obciążeniami dynamicznymi – w naszym kraju, a także na poziomie współpracy międzynarodowej.

4. Uwagi szczegółowe

Uwagi szczegółowe przedstawiam w kolejności ich formułowania w trakcie studiowania pracy, nie są one uporządkowane według znaczenia merytorycznego lub redakcyjnego:

- a) Str. 2³ (3 wiersz od góry): „operacyjna analiza modalna”; str. 3²: „Operacyjna Analiza Modalna” – w różnych miejscach rozprawy z niewiadomych powodów zastosowano różną pisownię tego terminu.
- b) Str. 11₉: „przemieszczeń liniowych” – chyba powinno być „przemieszczeń liniowych”?
- c) Str. 17₂₀: „Niestety wciąż w środowisku mostowym pokutuje błędne przekonanie, że próbne obciążenie dynamiczne służy ocenie nośności konstrukcji i wyraźnie zauważalny jest brak zrozumienia celu jakiemu powinny służyć badania dynamiczne” – uogólnienie to wydaje się zbyt daleko idące, a formułowane bez pełnego rozeznania i przekonywujących argumentów może okazać się wysoce niesprawiedliwe.
- d) Str 17₁₅: :”Układ pomiarowy składa się przeważnie z dwóch indukcyjnych czujników przemieszczeń liniowych uzupełnionych o akcelerometr” – patrz uwaga powyżej.
- e) Str 18₁₃: „...cel tego typu badań jest jasno nieokreślony...” chyba powinno być: „...cel tego typu badań nie jest jasno określony...”?
- f) Str. 27₁: użyto pojęcia „podatność dynamiczna” bez zdefiniowania tego terminu.
- g) Str. 51₅: „... są przebiegi czasowe drgań wysokiej jakości” chyba powinno być: „... są wysokiej jakości przebiegi czasowe drgań”?
- h) Str. 156²: „Możliwość obserwacji...była niemożliwa” chyba powinno być: „Nie było możliwości obserwacji...”?

Przedstawione wyżej nieliczne uwagi redakcyjne znacząco nie obniżają ogólnej wysokiej oceny opiniowanej rozprawy doktorskiej.

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Grzegorza Poprawy pt. „*Operacyjna analiza modalna w badaniach kratowych mostów kolejowych pod próbnym obciążeniem dynamicznym*” jest pracą o znaczej wartości merytorycznej – zarówno naukowej, jak i praktycznej, zawiera oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i świadczy o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych przez Doktoranta.

W recenzowanej pracy główną uwagę skoncentrowano na metodyce badań kolejowych obiektów mostowych pod obciążeniami dynamicznymi przy wykorzystaniu operacyjnej analizy modalnej. Na potrzeby pracy wykonano oryginalne badania doświadczalne szeregu obiektów mostowych, a badania i analizy wybranych 3 konstrukcji przęseł o dźwigarach kratownicowych przedstawiono szczegółowo. Opracowano modele numeryczne badanych obiektów oraz przedstawiono metodykę ich kalibracji i weryfikacji.

Autor rozprawy wykazał dużą wiedzę teoretyczną i praktyczną (udział w badaniach ok. 400 obiektów) w zakresie doświadczalnych badań konstrukcji inżynierskich oraz ich analiz numerycznych. Zaprezentował także umiejętności rozwiązywania problemów naukowych przy harmonijnym wykorzystywaniu narzędzi analizy teoretycznej i doświadczalnej, co zasługuje na szczególne podkreślenie.

Przedstawione w recenzji nieliczne uwagi krytyczne dotyczą głównie warstwy edytorskiej oraz językowej i nie mają istotnego wpływu na ogólnie wysoką ocenę recenzowanej rozprawy. Na podkreślenie zasługuje bogaty i starannie przygotowany materiał ilustracyjny, zapewniający dużą komunikatywność dysertacji.

Główny cel pracy – adaptacja operacyjnej analizy modalnej jako efektywnego narzędzia identyfikacyjnego w odniesieniu do kolejowych mostów kratowych pod obciążeniami dynamicznymi – został osiągnięty przy wykorzystaniu metod naukowych. Zalecenia dotyczące metodyki różnych aspektów stosowania tego narzędzia są zamieszczone w odpowiednich częściach pracy, a opracowana procedura została opisana w załączniku umieszczonym na końcu rozprawy.

Recenzowana praca, w mojej ocenie, **spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim** zgodnie z *Ustawą z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. nr 65, poz. 595, z późn. zm.). W związku z powyższym wnioskuję o jej **przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony**.

Wrocław, 21 maja 2018 r.

