

Wrocław, 23.08.2023 r.

dr hab. inż. Monika Podwórna, prof. PWr  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
Katedra Mechaniki Budowli i Inżynierii Miejskiej  
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej**  
**mgra inż. Rafała Pileckiego**  
**pt. <sup>1</sup>„Dynamiczna odpowiedź wielowarstwowych układów ciągłych**  
**na ruchome obciążenia”**  
**“The dynamic response of multilayer continuous systems to moving loads”**

**1. Podstawa i przedmiot opracowania**

**1.1. Podstawa formalna**

Podstawą formalną opracowania recenzji jest pismo Dziekana Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej Pani dr hab. inż. Lucyny Domagały, prof. PK z dnia 29 czerwca 2023 r. nr LO.510.42.3.2018, wraz z umową o dzieło na recenzję doktorską.

**1.2. Przedmiot opracowania**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgra inż. Rafała Pileckiego pt. „*Dynamiczna odpowiedź wielowarstwowych układów ciągłych na ruchome obciążenia*”, złożona na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej, napisana pod kierunkiem promotora Pana dr. hab. Piotra Koziola, prof. PK.

Doktorant reprezentuje dziedzinę *nauk inżynieryjno-technicznych*, dyscyplinę *inżynieria lądowa, geodezja i transport*.

**1.3. Podstawa prawna**

Podstawą prawną opracowania są:

- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (t.j. Dz.U. 2023 poz. 742 z późniejszymi zmianami);

1 Praca napisana w języku angielskim  
Wydziału Inżynierii Lądowej

Wpłynęło dnia 29 SIE 2023  
L. dz. LO.510.42.3.2018  
podpis [podpis]

- Ustawa z dnia 3 lipca 2018 r. *Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. 2018 poz. 1669 z późniejszymi zmianami)  
*Art. 179. U. 1. Przewody doktorskie, postępowania habilitacyjne i postępowania o nadanie tytułu profesora wszczęte i niezakończone przed dniem wejścia w życie ustawy, o której mowa w art. 1, są przeprowadzane na zasadach dotychczasowych, z tym że jeżeli nadanie stopnia doktora, stopnia doktora habilitowanego lub tytułu profesora następuje po dniu 30 kwietnia 2019 r., stopień lub tytuł nadaje się w dziedzinach i dyscyplinach określonych w przepisach wydanych na podstawie art. 5 ust. 3 tej ustawy;*
- Ustawa z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (t.j. Dz.U. 2017 poz. 1789)  
*art. 51.u. 1. Przewody doktorskie i habilitacyjne, niezakończone do dnia wejścia w życie ustawy, są prowadzone na podstawie przepisów dotychczasowych;*
- Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 stycznia 2018 roku *w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora* (Dz. U. 2018, poz. 261).

## 2. Kryterium oceny

W niniejszej opinii, rozprawę analizowano pod kątem spełnienia punktów zawartych w art. 13 u. 1. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. *o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki*, a mianowicie:

*Rozprawa doktorska, przygotowywana pod opieką promotora albo pod opieką promotora i promotora pomocniczego, powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego lub oryginalne rozwiązanie problemu w oparciu o opracowanie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne, lub oryginalne dokonanie artystyczne, oraz wykazywać ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej lub artystycznej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.*

## 3. Ogólna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Rafała Pileckiego pt. „*Dynamiczna odpowiedź wielowarstwowych układów ciągłych na ruchome obciążenia*” dotyczy analizy modeli typu belka – podłoże z uwzględnieniem cech nieliniowych. Praca napisana jest w języku angielskim.

Zakres pracy obejmuje sześć zasadniczych zadań:

- *rozwiązanie problemu propagacji fali dla pustki kulistej zanurzonej w ośrodku, otoczonej warstwami i poddanej obciążeniu działającemu na jej ściany od wewnątrz;*
- *rozwiązanie dla układu belki podwójnej z nieliniową lepkosprężystą warstwą łączącą belki, poddanego działaniu sił przemieszczających się ze stałą prędkością wzdłuż górnej belki, spoczywającego na podłożu lepkosprężystym;*
- *rozwiązanie analogicznego układu z nieliniowym lepkosprężystym podłożem;*
- *opracowanie efektywnej procedury obliczeniowej umożliwiającej wydajne badania parametryczne rozważanych modeli (wraz z budową algorytmu obliczeniowego pozwalającego na automatyzację obliczeń w zakresie różnych zestawów parametrów fizycznych);*
- *zastosowanie opracowanej techniki obliczeniowej do rozwiązania dwuwarstwowego modelu drogi szynowej, zakładającego nieliniową sztywność systemu przytwierdzeń;*
- *zastosowanie generatora sił losowych do układu belki podwójnej.*

Wnioski uzyskane na podstawie przedmiotowych analiz mogą być wykorzystane do badania pracy konstrukcji kolejowych.

Rozprawę podzielono na 15 rozdziałów. Ostatnie dwa rozdziały to w zasadzie załącznik do dysertacji - 5 współautorskich publikacji oraz tabelaryczne zestawienie procentowego udziału pracy Doktoranta. We wcześniejszym rozdziale zamieszczono spis literatury (126 nieponumerowanych pozycji, w tym 35 promotora pracy). Do pracy dołączono streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca zawiera 22 ponumerowanych rysunków, 24 ponumerowanych wzorów. Praca nie jest zbyt obszerna - łącznie liczy 129 stron.

Rozdział 1 zawiera wstęp do pracy.

Rozdział 2 jest wprowadzeniem do problemu badawczego.

Rozdział 3 zawiera jasno określone: cele, tezę oraz wyniki pracy.

Rozdział 4 prezentuje skrótowy przegląd literatury z tematu badawczego – obciążenia ruchome, belki warstwowe oraz cechy nieliniowości w układach dynamicznych.

Rozdział 5 przedstawia etapy prac ze skrótowym opisem podstawowych modeli, które są rozszerzane w dalszych rozdziałach.

Rozdział 6 dotyczy algorytmu obliczeniowego pozwalającego na obliczenie istotnych charakterystyk układu. Proponowane podejście łączy kilka technik aproksymacji: metody dekompozycji Adomiana, transformaty Fouriera oraz przybliżeń analitycznych opartych na rozwinięciach falkowych wykorzystujących filtry typu Coiflet. W pracy zostało wykorzystane komercyjne oprogramowanie WOLFRAM MATHEMATICA.

Rozdział 7 opisuje główne wyniki badań, które zostały opublikowane w pracach będących rozdziałem 15, a mianowicie:

- kulista pustka otoczona warstwami, poddana obciążeniu [P2];
- model podwójnej belki z nieliniową lepkosprężystą warstwą łączącą belki spoczywającą na liniowym lepkosprężystym podłożu, obciążony siłami ruchomymi poruszającymi się po górnej belce [P1];
- model podwójnej belki z nieliniową lepkosprężystą warstwą łączącą belki spoczywającą na nieliniowym lepkosprężystym podłożu, obciążony siłami ruchomymi [P3, P5];
- możliwość analizy dynamiki toru kolejowego z wykorzystaniem zastosowanych modeli [P4].

Rozdział 8 prezentuje wprowadzenie elementu losowego do modelu. W pracy przedstawiono algorytm tworzenia losowej nierówności górnej belki na wzór nierówności szyn, wypracowany wspólnie przez Panów Kozioł, Kudła i Pilecki.

Rozdział 9 dotyczy badania dynamiki rzeczywistego toru kolejowego w kierunku pionowym, przy założeniu obciążenia generowanego przez dwie osie wózka jezdnego pociągu EMU250 PENDOLINO, poruszającego się ze stałą prędkością 200 km/h.

Rozdział 10 zawiera wnioski końcowe.

Rozdział 11 jest skrótowym opisem istotnego wkładu w dziedzinę nauki oraz oświadczenie o samodzielności pracy podjętej przez Autora rozprawy.

Rozdział 12 prezentuje wytyczone potencjalne kierunki dalszych prac badawczych w przedmiotowej tematyce.

Rozdział 13 zawiera spis literatury.

Rozdział 14 to tabelaryczne zestawienie procentowego udziału pracy Doktoranta i Współautorów (40% + 25% + 40% + 20% + 65%; co daje ułamkowy udział 0,38). Na s. 50 jest szczegółowo opisany wkład Doktoranta.

Rozdział 15 składa się z kopii 5 prac współautorskich z okresu 2018 – 2021 stanowiących integralną część rozprawy i prezentujących najważniejsze wyniki badań.

Stwierdzam, że zaproponowany w rozprawie doktorskiej układ rozdziałów jest logiczny i przejrzysty. Praca jest napisana starannie, poprawnym językiem. Rysunki nie budzą zastrzeżeń.

## **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

### **4.1. Wybór tematyki rozprawy**

Problematyka rozprawy należy do zagadnień dynamiki konstrukcji. Tematyka pracy – teoretyczne analizy wielowarstwowych nieliniowych modeli belkowych - zawarta jest w zakresie badań w dyscyplinie inżynieria lądowa, geodezja i transport. W pracy przeprowadzono analizę parametryczną nieliniowego modelu dynamicznego w postaci podwójnej belki (pot. typu „belki sandwichowej”) o nieskończonej długości spoczywającej na podłożu lepkosprężystym. Górna belka obciążana jest układem ruchomych sił rozłożonych o zadanej gęstości lub siłą losową. Analizy drgań pionowych belek zostały przeprowadzone z wykorzystaniem semi-analitycznej metody opartej na aproksymacjach falkowych połączonych z dekompozycją Adomiana.

Zagadnienie jest istotne, gdyż pozwala na poszukiwanie skutecznych metod analizy pracy toru kolejowego, zwłaszcza kolei dużych prędkości. Podjęte badania posiadają zarówno walor naukowy, jak i duże znaczenie praktyczne.

Rozważany problem badawczy jest oryginalny. Praca zawiera analizę teoretyczną i symulacje komputerowe przeprowadzone przez Autora. Doktorant zainteresował się zagadnieniem, które nie zostało jeszcze w dostatecznym stopniu zbadane, proponuje autorskie podejście, w którym wskazuje odpowiednie narzędzie rozwiązania tego problemu.

Oceniam podjęty w pracy doktorskiej temat jako bardzo ambitny i zasadny do rozważań naukowych, a wyniki badań i analiz, uważam jako bardzo użyteczne w praktyce budowlanej.

### **4.2. Główne osiągnięcia rozprawy**

Rozprawa ma charakter teoretyczny i analityczny z pokazaniem praktycznych zastosowań rozważanych modeli. Głównym zagadnieniem podjętym w pracy jest stworzenie narzędzia do badania uproszczonych modeli układów dynamicznych, opartego na metodach półanalitycznych, pozwalającego na precyzyjną analizę parametryczną złożonych układów nieliniowych poprzez zastosowanie efektywnych analitycznych procedur aproksymacyjnych. Zauważalny jest nieznaczny niedostatek pracy, tj. brak badań doświadczalnych przeprowadzonych samodzielnie przez Autora. Mając świadomość olbrzymich trudności w zorganizowaniu takiego przedsięwzięcia, zasadnym wydaje się zaakceptowanie weryfikacji empirycznej zaproponowanych rozwiązań w postaci zaimplementowania parametrów toru uzyskanych we wcześniejszych badaniach doświadczalnych przeprowadzonych przez macierzystą jednostkę Doktoranta. Ze względu na warstwowość belki, nieliniowość elementów oraz uwzględnienie losowości, praca jest dużym wyzwaniem zarówno

matematycznym, jak i obliczeniowym. Główny cel pracy został osiągnięty przy wykorzystaniu aproksymacji analitycznych i technik semi-analitycznych. Realizacja celu wymagała od Autora przeprowadzenia studiów literaturowych, wykazania się wiedzą ze znajomości zagadnień teoretycznych, a także wiedzy praktycznej i umiejętności posługiwania się metodami badawczymi.

#### 4.3. Ogólna ocena rozprawy

Sformułowane cele rozprawy doktorskiej

1. *budowa i analiza parametryczna nieliniowego modelu dynamicznego belki podwójnej spoczywającej na lepkosprężystym podłożu;*
2. *zastosowanie opracowanego modelu i procedury obliczeniowej do analizy dynamiki toru kolejowego;*

zostały osiągnięte. Badania naukowe zrealizowane w ramach rozprawy wnoszą wiele oryginalnych elementów w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Podsumowując, o pozytywnej ocenie dysertacji decydują poniższe cechy:

- o tematyka rozprawy jest dobrze dobrana;  
Temat jest ciekawy z poznawczego punktu widzenia. Zagadnienia wymagają zarówno wiedzy ogólnej jak i specjalistycznej.
- o sformułowane tezy i cele pracy należy uznać za wykazane i osiągnięte;
- o praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego;  
Oprócz oryginalności, podjęte zagadnienie powiązane jest bezpośrednio z potrzebami praktyki inżynierskiej.
- o struktura pracy jest w miarę przejrzysta i logiczna;  
Poszczególne rozdziały oraz analizy są dobrze dobrane i właściwie podsumowane. Słusznie Doktorant podkreślił w streszczeniu, że istotnym załącznikiem do dysertacji są publikacje P1-P5 (zob. s. 6 „*main core of the dissertation*”).
- o stan wiedzy literaturowej jest aktualny;  
Literatura przedmiotu rozprawy jest dobrze rozpoznana.
- o rozprawa jest dobrze zredagowana;  
Od strony technicznej, pomijając drobne mankamenty, rozprawa jest starannie przygotowana pod względem edytorskim. Zamieszczone rysunki i tablice są czytelne. Terminologia jest prawidłowa. Praca napisana jest poprawnym językiem angielskim, bez istotnych usterek gramatycznych.

## 5. Uwagi szczegółowe i dyskusyjne

### 5.1. Uwagi redakcyjne

Bardzo wysoko oceniam walory redakcyjne pracy, niemniej jednak mam kilka uwag krytycznych:

1. W pracy występują nieliczne nieścisłości w oznaczeniach. Poniżej wątpliwości Recenzenta:
  - czy symbol  $l$  w podpisach do rysunków 9, 11, 12 i 13 (podobnie jak w pracy P1) jest symbolem  $s_l$  we wzorze 4 ze s. 15?
  - czy symbol  $r$  we wzorze 4 na s. 15 oznacza inną wielkość niż  $r$  we wzorach 8 - 12 oraz na rys. 14 na s. 32?
  - czy symbol  $K$  w przyjętych danych opisanych na s. 39 (podobnie jak w pracy P4) nie oznacza tego samego co symbol  $L$  we wzorze 4 na s. 15?
2. Czytanie pracy może wydawać się nieco utrudnione, gdyż brakuje konsekwencji w kolejności wymieniania ważnych 5 prac, będących załącznikiem do dysertacji – inna jest kolejność na s. 69, inna w spisie literatury i jeszcze inna w załączniku. W związku z powyższym w niniejszej recenzji przyjęto kolejność dodanych prac przedstawionych w załączniku oraz dodatkowo oznaczono je symbolami P1-P5, z wyjaśnieniem na końcu.

### 5.2. Uwagi merytoryczne

Szczegółowa analiza rozprawy pozwala na przedstawienie kilku uwag o charakterze dyskusyjnym. Uwagi te wymagają skomentowania przez Autora w ramach referatu lub podczas odpowiedzi na pytania w dyskusji.

1. Czy były przeprowadzane próby analizowania innego rodzaju obciążenia górnej belki, np. deterministyczne oscylatory jedno- lub dwumasowe, stochastyczne procesy lub inne modele obciążenia ruchomego?
2. We wzorze 2 na s. 14 jest zapis siły składającej się z 3 komponentów. Proszę o rozwinięcie trzeciego składnika, tj.  $P_R(x, t, \gamma)$ . W jaki sposób interpretowane są *inne losowe imperfekcje* („the term  $P_R(x, t, \gamma)$  is random function generated by other random imperfections in structure that can cause dynamic changes”). Co jest niezdefiniowanym parametrem  $\gamma$ ? W pracy P3 jest krótka wzmianka o badaniach doświadczalnych potwierdzających zasadność przyjęcia losowych składników sił (komponent 2 i 3) – odwołanie do publikacji P. Kozioł, “Experimental validation of wavelet based solution for dynamic response of railway track subjected to a moving

train”, Mechanical Systems and Signal Processing, 79, 174-181, 2016. (*... and varying in time (related to conventional track with sleepers and sinusoidal signal associated with sleepers spacing), is experimentally confirmed [8]*). Czy można nieco rozszerzyć ten wątek badań?

3. Rysunki 9, 11, 12, 13 oraz rysunki w pracach P1 i P3 przedstawiają odpowiedzi układu otrzymane przy poruszających się dwóch siłach. W pracach P4 i P5 analizowano wyniki dla trzech sił. Czy były przeprowadzane próby dla większej ilości sił – tak aby odwzorowywały cały skład pociągu?
4. Czytelnik może znaleźć w pracy informacje o długim czasie obliczeń – co to znaczy „time-consuming” – zob. np. na s. 24 („highly time-consuming”), s. 28 („extremely time-consuming”), s. 35 („the time ... increased dramatically ...”). Wydaje się to oczywiste przy tak mocno rozbudowanym modelu matematycznym. Zdaniem Recenzenta warto byłoby przedstawić np. średni czas obliczeń, gdyż nie wiadomo, czy było to liczone w godzinach czy dniach pracy sprzętu (o jakich parametrach) obliczeniowego?
5. W pracy można znaleźć wiele matematycznych informacji o nieliniowości sztywności podłoża oraz warstwy łączącej belki – zob. np. wzory 3 na s. 14 (por. wzory 1 pracy P1), 7 s. 19 (lub wzory 8 pracy P3). Przeciętnemu czytelnikowi brakuje jednak informacji łączących te wzory. W pracy P5 temat nieliniowości został nieco szerzej opisany. W dysertacji, na s. 35, jest zapis o przyjętych założeniach potwierdzonych doświadczalnie. Brak jest szczegółów badań eksperymentalnych. Zdaniem Recenzenta, ważny element pracy jakim jest nieliniowość układu, powinien być szerzej opisany – podobnie jak zostało to przedstawione dla losowości w rozdziale 8.
6. W rozdziale 9 przytoczone są parametry rzeczywistego toru kolejowego. Czy Autor mógłby rozwinąć temat przeprowadzonych badań doświadczalnych i uzyskanych wyników? Czy Doktorant brał czynny udział w tych badaniach? Kiedy i gdzie zostały przeprowadzone?
7. W rozdziale 12 opisane zostały propozycje przyszłych prac badawczych Doktoranta, które mogą być zrealizowane w oparciu o wyniki przedstawione w rozprawie. Dlaczego uważa Pan, że model belki Timoshenki dobrze mógłby odwzorować szyny kolejowe?

Reasumując stwierdzam, że przedłożona rozprawa doktorska jest autorskim osiągnięciem naukowym. W pracy nie znajduję błędów merytorycznych. Uwagi Recenzenta mają jedynie charakter dyskusyjny i nie obniżają bardzo dobrej oceny rozprawy doktorskiej.

## 6. Wniosek końcowy

Rozprawa doktorska będąca przedmiotem niniejszej opinii stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i wnosi wkład w rozwój dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i wykorzystania odpowiednich metod naukowych i technik badawczych.

Doktorant zrealizował problematykę badawczą określoną w celu oraz w zakresie dysertacji. Poprawnie sformułował tezy pracy oraz udowodnił ich zasadność. Wykorzystał właściwe metody badań i odpowiednie analizy, wnosząc do pracy własne oryginalne elementy.

**Recenzowana rozprawa mgr inż. Rafała Pileckiego pt. „*Dynamiczna odpowiedź wielowarstwowych układów ciągłych na ruchome obciążenia*” spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t.j. Dz.U. 2017 poz. 1789).**

**Stawiam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport Politechniki Krakowskiej o przyjęcie rozprawy oraz o dopuszczenie Autora do publicznej obrony.**

dr hab. inż. Monika Podworna/prof. PWR

### Oznaczenia:

- [P1] Koziol P., Pilecki R., 2018. *Dynamic response of double-beam system with nonlinear viscoelastic layer to moving load*. <https://dx.doi.org/10.1051/mateconf/201821111008> - udział 40%
- [P2] Koziol P., Mares C., Pilecki R., 2019. *Spherical cavity in the layer subjected to dynamic load*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910601025> - udział 25%
- [P3] Koziol P., Pilecki R., 2020. *Semi-analytical modelling of multilayer continuous systems nonlinear dynamics*. Archives of Civil Engineering Vol. 66, nr 2, 165-178 – udział 40%
- [P4] Koziol P., Pilecki R., 2020. *Continuous nonlinear double-beam system as a reliable model of railway track dynamics*. Zeszyty Naukowe SITK RP Oddział w Krakowie – udział 20%
- [P5] Koziol P., Pilecki R., 2021. *Nonlinear double-beam system dynamics*. <https://doi.org/10.24425/ace.2021.137172> - udział 65%