

Profesor Tomasz Krzyżyński  
Katedra Mechatroniki i Automatyki  
Politechnika Koszalińska

Koszalin, 01.08.2023

Opinia o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Rafała Pileckiego

**pt. The dynamic response of multilayer continuous systems to moving loads**

(Dynamiczna odpowiedź wielowarstwowych układów ciągłych na ruchome obciążenia)

Przewód doktorski otwarty w dniu 21.11.2018 na podstawie przepisów Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z 2003 r., prowadzony jest na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej (PK), promotorem rozprawy jest dr hab. Piotr Koziół, prof. PK

Badanie dynamiki układów mechanicznych poddanych działaniu ruchomych obciążeń ma długą historię, przede wszystkim związaną z rozwojem transportu. Oddziaływanie pojazdu samochodowego z drogą, pociągu z torem, samolotu z drogą startową, samochodu lub pociągu z mostem lub wiaduktem, stanowią wciąż aktualny przedmiot intensywnych badań. Mimo ogromnej liczby publikacji, różnego rodzaju dysertacji i innych opracowań zawierających wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych, tematyka dynamiki oddziaływania podukładów w ruchu względnym jest wciąż aktualna. Jedną z przyczyn tego stanu rzeczy jest ciągły wzrost prędkości środków transportu, wzrost wymogów w zakresie bezpieczeństwa lub pojawienie się nowych norm, np. dotyczących tzw. śladu węglowego lub emisji hałasu. Skupiając się tylko na zagadnieniach poruszanych w ocenianej pracy - inżynierii transportu szynowego, rozwój elementów konstrukcyjnych drogi szynowej (np. systemów przytwierdzeń) o właściwościach mechanicznych wykazujących nieliniowe cechy sprawia, że dotychczas stosowane szeroko modele liniowe w pewnych zakresach wartości istotnych parametrów, stają się praktycznie bezużyteczne. Brak modeli analitycznych i związanych z tym studiów parametrycznych stał się motywacją do podjęcia przez Doktoranta kierowanego przez Promotora o znaczących kompetencjach, badań w przedmiotowym zakresie.

DETERKANAT	
Wydziału Inżynierii Lądowej	
Wpłynęło dnia	3.08.2023
L. dz.	10.510.42.5.2023
podpis	<i>Raupa</i>

Rozprawa mgr. inż. Rafała Pileckiego dotyczy zatem bardzo ważnej i aktualnej tematyki badawczej opracowania modeli i uzyskania rozwiązań w przypadku nowych rozwiązań technicznych w inżynierii kolejowej z uwzględnieniem rzeczywistych nieliniowości fizycznych, co oznacza optymalne z punktu widzenia osiągnięć i oddziaływania na środowisko, projektowanie i eksploatację układów.

Doktorant, opierając się na dobrze dobranej literaturze (kilkadziesiąt pozycji) postanowił sprawdzić, jaki wpływ na odpowiedź dynamiczną układu modelującego tor kolejowy będą mieć, w określonych warunkach obciążenia, wybrane parametry fizyczne wewnętrznych połączeń w torze oraz podłoża.

Przedłożona do recenzji praca liczy łącznie 129 stron. Zasadniczy tekst rozprawy to 63 strony, gdzie dołączono oświadczenia autorów wspólnych publikacji, ich spis oraz same publikacje (5 publikacji z Promotorem). Autor zaleca ich lekturę w całości w celu zrozumienia rozprawy.

Konstrukcja rozprawy jest prawidłowa dla tego typu opracowań naukowych, obejmuje wprowadzenie i uwagi wstępne, cel i zakres pracy, przegląd literatury oraz kilka rozdziałów zasadniczych merytorycznie. Pierwsze rozdziały przybliżają dotychczasowy stan wiedzy i usytuowanie tamże badań własnych Doktoranta, a ostatnie zawierają podsumowanie, wnioski końcowe i kierunki dalszych badań. Praca napisana jest w języku angielskim.

### **Cel i przedmiot rozprawy, struktura i zakres pracy.**

Zasadniczym celem rozprawy jest budowa i analiza parametryczna nieliniowych modeli analitycznych wielowarstwowych typu belka-podłoże.

Przedmiotem badań są modele dwubelkowe o nieliniowym wzajemnym oddziaływaniu na podłożu lepkosprężystym, również o własnościach nieliniowych. Zbudowane modele wraz z opracowaną procedurą obliczeniową zastosowano do analizy dynamiki toru kolejowego.

Po dokonaniu wprowadzenia do tematyki pracy (*Preliminary remarks, Introduction*) Doktorant sformułował zasadniczą tezę pracy, a następnie ją udowodnił: *Nowoczesne narzędzia do badania uproszczonych modeli układów dynamicznych, oparte o metody półanalityczne z zastosowaniem procedur aproksymacyjnych, pozwalają na dokładną analizę parametryczną złożonych układów nieliniowych.*

W Rozdziale czwartym (*Literature review*) Doktorant dokonał przeglądu najważniejszych publikacji z zakresu tematycznego pracy, skupiając uwagę na zasadniczych elementach zbudowanego własnego modelu i opracowanej procedury obliczeniowej.

Najważniejszym wnioskiem wynikającym z tego przeglądu jest stwierdzenie braku rozwiązań analitycznych w przypadku modelu dwubelkowego z nieliniowym ich połączeniem, co stanowi zasadniczą motywację podjęcia przez Doktoranta tejże tematyki.

W Rozdziale piątym (*Models and workflow - Continuous, infinitely long double-beam model - Moving load modeling - Semi-analytical wavelet based approach*) Doktorant scharakteryzował zastosowane w pracy modele układów mechanicznych obciążającego je ruchomego obciążenia, omówił pokrótce zastosowane następnie w obliczeniach podejście półanalityczne oraz zaprezentował ogólny schemat uzyskiwania wyników zawartych w pracy.

W Rozdziale szóstym (*Computational method, algorithm and non-triviality*) Doktorant dokonał prezentacji zastosowanego algorytmu obliczeniowego i jego najważniejszych właściwości w kontekście możliwości znalezienia stabilnego rozwiązania problemu nieliniowego, w formie schematów blokowych, fragmentów kodu źródłowego i wybranych rezultatów w formie graficznej.

W Rozdziale siódmym (*Main results published in papers*) Doktorant opisał pokrótce najważniejsze wyniki uzyskane w załączonych do pracy publikacjach, stanowiących integralną część rozprawy (ich tytuły i pełne dane bibliograficzne podano w Rozdziale piętnastym – *Appendix*). Dość szczegółowo omówiono rozwiązanie problemu dynamiki pustki kulistej otoczonej warstwami i zanurzonej w ciele stałym (*The spherical cavity immersed in solid*) oraz belki podwójnej z nieliniową łączącą warstwą lepkosprężystą na liniowym podłożu lepkosprężystym pod obciążeniem ruchomym, (*Solution of the double-beam model with nonlinear stiffness of the layers connecting the beams*). Ponadto, przeprowadzono tam dyskusję odpowiedzi dynamicznej podobnej belki podwójnej jednakże na nieliniowym podłożu lepkosprężystym (*Solution of the double-beam model with nonlinear stiffness of the viscoelastic layer connecting the beams, resting on a nonlinear viscoelastic foundation*) oraz dyskusję możliwych zastosowań opracowanych modeli i procedur w rozwiązywaniu problemów dynamiki toru kolejowego (*Discussion on possible application of the developed nonlinear model to study the dynamics of the railway track*).

W Rozdziale ósmym (*Random system*) Doktorant zawarł opis losowego układu dwubelkowego z zastosowaniem siły stochastycznej powstałej jako efekt imperfekcji geometrycznych w torze lub w układzie wzajemnego oddziaływania koło-szyna.

W Rozdziale dziewiątym (*Application to railway dynamics*) Doktorant przedstawił oryginalne wyniki obliczeń popierające konieczność uwzględniania pojawiających się nieliniowości w praktyce inżynierskiej.

W Rozdziałach Nr 10-12 zawarto najważniejsze wnioski, prezentację wkładu Doktoranta w eksplorowany obszar badawczy oraz perspektywy Jego dalszych badań.

### **Najważniejsze rezultaty uzyskane w rozprawie**

Pomijając ciekawe, aczkolwiek powiązane luźniej z zasadniczą tematyką pracy rezultaty dotyczące pustki kulistej, w przypadku układów opracowanych do badania dynamiki toru kolejowego uzyskano szereg istotnych i ważnych z punktu widzenia teorii i praktyki inżynierskiej rezultatów. Należy do nich sformułowanie i rozwiązanie dynamiki nieskończenie długiego układu dwubelkowego, opartego na liniowym bądź nieliniowym podłożu lepkosprężystym, z warstwą łączącą pomiędzy belkami o nieliniowych właściwościach poddanego działaniu zestawu sił ruchomych. Ponadto, do ważniejszych rezultatów rozprawy należy opracowanie algorytmu obliczeniowego z wykorzystaniem technik półanalitycznych do znajdowania rozwiązań zbieżnych w zadanym obszarze parametrów, pozwalającego na analizę parametryczną układów dwubelkowych. Algorytm ten pozwolił również na wykazanie, że rozważany problem nieliniowy nie jest trywialny. Ciekawym i nowatorskim jest zaprezentowany w pracy algorytm generowania losowych nieregularności belek w celu modelowania sił losowych w oddziaływujących podukładach typu pojazd-tor. Najważniejszym rezultatem końcowym jest jednak zastosowanie zbudowanych modeli i opracowanych procedur obliczeniowych do badania dynamiki toru kolejowego z wykorzystaniem rzeczywistych parametrów konstrukcji w postaci danych uzyskanych eksperymentalnie, w przypadku sztywności układu szyna-mocowanie i podłoża, w obu przypadkach o właściwościach nieliniowych.

### **Uwagi szczegółowe**

Do ważniejszych kwestii redakcyjnych wymagających komentarza jest nadmierne użycie w pracy słowa „previously”, które, jeśli odnosi się do poprzednich publikacji powinno być uzupełnione o źródło, natomiast w przypadku rezultatów uzyskanych w ocenianej rozprawie, należy doprecyzować, w którym miejscu (rozdział, strona, wzór itp.) można je odnaleźć. Ponadto, schematy przedstawione na rysunkach 4-8 stają się czytelne po znacznym ich powiększeniu. W zakresie merytorycznym, przydałoby się krótkie omówienie wraz z ilustracją graficzną wzoru (4) określającego postać ruchomego obciążenia. Człon opisujący kontakt

w układzie koło-szyna w przypadku zastosowanego modelu belki wydaje się nie mieć istotnego wpływu na rezultaty, a jeśli ma, to jakie? Ponadto, czy chodzi o rozprzęgnięcie układu równań różniczkowych typu (7 a-b) (*decoupling the joint partial differential equations*), a jeśli tak to w jaki sposób jest dokonywane? Ostatnia uwaga dotyczy modelu belki Timoshenki i uwzględnienia inercji ruchomego obciążenia. Te dwa elementy, zaplanowane do realizacji w dalszej perspektywie badawczej, w sposób znacząco dokładniejszy oddawałyby dynamikę układów występujących w praktyce inżynierskiej, zwłaszcza w zakresie dużych prędkości. Jeśli zaś chodzi o same zagadnienia praktyczne, to wprowadzić w obliczeniach zastosowano parametry uzyskane za pomocą pomiarów polowych, ale brakuje porównania uzyskanych w pracy wyników z pomiarami na torze rzeczywistym.

### **Ogólna ocena merytoryczna**

Przedłożoną pracę należy ocenić wysoko. Przede wszystkim ocena ta dotyczy efektywnego rozwiązania przez Doktoranta problemów dynamiki układów modelowanych powszechnie jako liniowe, tymczasem od pewnego czasu stosowane są elementy mocujące oraz tzw. przekładki o własnościach nieliniowych. Oprócz opisanych powyżej modeli dwubelkowych, należy podkreślić opracowaną w rozprawie procedurę obliczeniową. Doktorant zastosował nowoczesne narzędzia semianalityczne oparte na aproksymacjach falkowych, z wykorzystaniem rozkładu czynników nieliniowych na szereg Adomiana, udoskonalając i przyspieszając przy tym procedury obliczeniowe stosowane wcześniej przez Jego Promotora. Większość prezentowanych w rozprawie rezultatów została opublikowana w uznanych i renomowanych czasopismach i poddana dyskusji na międzynarodowych konferencjach.

### **Podsumowanie i wniosek końcowy**

Mając powyższe na uwadze oraz fakt, iż rozwiązywane problemy badawcze dotyczą bezpośrednio zagadnień teoretycznych związanych z transportem szynowym należy stwierdzić, że przedłożona rozprawa doktorska prezentuje bardzo dobrą ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie Inżynieria lądowa, geodezja i transport.

Przedłożona rozprawa doktorska niewątpliwie wykazuje umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej Doktoranta, o czym świadczą m. in. publikacje o znaczącym Jego

udziale oraz liczne referaty konferencyjne Doktoranta, który po otwarciu przewodu doktorskiego w roku 2018 wykazuje dużą aktywność w tym zakresie.

Bezdyskusyjny jest również fakt, że przedłożona rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a ponadto stanowi potencjalne zastosowanie w sektorze gospodarki związanej z transportem.

Podsumowując, stwierdzam, że Doktorant wykazuje dobrą znajomość podjętej tematyki badawczej, poprawnie postawił tezę pracy i ją udowodnił z zastosowaniem poprawnych modeli matematycznych i oryginalnych procedur obliczeniowych. Przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymogi Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. z późn. zm. Wnioskuje zatem o dopuszczenie mgr. inż. Rafała Pileckiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Tomasz Kuzioł*