

Poznań, dnia 25.01.2021

dr hab. inż. Tomasz Garbowski
Instytut Analizy Konstrukcji
Wydział Inżynierii Lądowej i Transportu
Politechnika Poznańska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

pt. „Wykrywanie zmian w węzłach konstrukcji
z wykorzystaniem badań nieniszczących”

autorstwa mgr inż. Dominiki Ziaji

1. PODSTAWA FORMALNA OPRACOWANIA RECENZJI

Podstawę formalną opracowania recenzji stanowi Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 9 grudnia 2020 oraz pismo prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport tejże Uczelni, a także umowa o dzieło numer NN/114/2020 zawarta w dniu 10 grudnia 2020.

2. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Dominiki Ziaji. Promotorem pracy jest dr hab. inż. Bartosz Miller, prof. PRz, promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Piotr Nazarko, prof. PRz. Rozprawa ma charakter doświadczalny i liczy 190 stron, które wraz z Dodatkiem A stanowią zasadniczą część pracy. Dodatkowo, na końcu pracy zamieszczono streszczenie w języku polskim oraz *summary* w języku angielskim. Praca składa się z 6 rozdziałów, wykazu ilustracji i tabel oraz listy bibliograficznej. Zawiera 80 rysunków / fotografii / wykresów, 8 tabel i zaledwie 21 wzorów matematycznych.

Rozpoczyna się spisem treści z bardzo przejrzystym formatowaniem informacji dotyczącej struktury opracowania oraz odnośnikami do stron, od których rozpoczynają się poszczególne rozdziały i podrozdziały.

Właściwa struktura pracy umożliwi czytelnikowi na szybkie zorientowanie się w zakresie poruszanych w niej zagadnień. Przyjęty układ pracy i sposób uporządkowania treści jest logiczny, typowy dla prac o charakterze doświadczalnym. Praca jest dość obszerna, choć w moim odczuciu brakuje w niej szczegółowych informacji na temat wykorzystanych w pracy, np. algorytmów uczących ANN, czy algorytmów do korelacji obrazu. Rozszerzenie pracy o kilka, kilkanaście stron z teorią pomogłoby zbudować wrażenie, że Autorka nie tylko potrafi biegłe wykorzystywać instrumenty i narzędzia do prowadzenia badań, ale też rozumie zasady ich działania.

Praca napisana jest poprawną polszczyzną, jest bardzo starannie zredagowana i nie budzi zastrzeżeń od strony estetycznej i graficznej. Wprawdzie zauważa się drobne usterki redakcyjne, które zostały wymienione w p. 4.2 niniejszej recenzji.

Dobór literatury jest trafny, choć tematyka wielu cytowanych prac nie zawsze bezpośrednio dotyczy zakresu opracowania. Oznacza to jednak, że zainteresowania Pani mgr inż. Dominiki Ziája znacznie wykraczają poza tematykę opisaną w pracy doktorskiej. Autorka przytoczyła łącznie 289 pozycji bibliograficznych. Należy zaznaczyć, że spośród cytowanych prac znajduje się 8 prac własnych, w których była współautorką (5 indeksowanych w SCOPUS). W tym sześć jako pierwsza autorka, siedem prac wspólnych z promotorem Prof. Bartoszem Millerem i niestety ani jednej pracy z promotorem pomocniczym Prof. Piotrem Nazarko, co budzi oczywistą ciekawość dot. roli promotora pomocniczego w badaniach prowadzonych przez Kandydatkę.

Zaprezentowana lista bibliograficzna świadczy o dobrym rozeznaniu Autorki w zakresie problemów analizowanych zarówno w rozprawie doktorskiej jak i znacznie wybiegających, choć ciągle mieszczących się w ogólnie rozumianym zakresie nieniszczących technik kontroli i oceny stanu technicznego konstrukcji inżynierskich.

3. OCENA PRACY

Opiniowana rozprawa dotyczy ważnych i aktualnych zagadnień z zakresu szeroko pojętej diagnostyki budowli, w szczególności skupia się na krytycznym porównaniu trzech różnych technik pomiarowych zastosowanych do tej samej konstrukcji, co pozwoliło Autorce sprawdzić użyteczność każdej z nich, wskazując jednocześnie ich wady i zalety.

Autorka precyzyjnie zaplanowała realizację swoich badań i analiz, co znajduje odzwierciedlenie już na etapie spisu treści. Świadczy to o dobrym przygotowaniu Autorki do realizacji zaawansowanych badań naukowych. W pierwszych rozdziałach Autorka definiuje tezę oraz przedstawia cel i zakres pracy. Następnie przedstawia różne techniki pomiarowe, aparaturę badawczą, wymagania poszczególnych metod, ich słabe i mocne strony oraz podstawowe równania fizyczne analizowanych zagadnień. Po przedstawieniu metod przetwarzania danych pomiarowych (m.in. analizę składników głównych i sztuczne sieci neuronowe), zapoznaje czytelnika z podstawowymi problemami dotyczącymi analizowanych w rozprawie zagadnień. W dalszej części krótkiego rozdziału nr 2 (zaledwie 5 stron) Autorka przedstawia metody laboratoryjne i przyjęte scenariusze uszkodzeń oraz procedury wykorzystania sztucznych sieci neuronowych.

Najważniejszą częścią pracy, której Autorka poświęca aż 46 stron, dotyczy detekcji zmian w połączeniach śrubowych dwukondygnacyjnej ramy portalowej na podstawie pomiarów dynamicznych (tj. pomiarów drgań z analizą modalną). W pierwszej części tego rozdziału Autorka opisuje prace związane z przygotowaniem pomiarów drgań konstrukcji. W tym celu przeprowadzona została teoretyczna analiza zagadnienia oraz krytyczna ocena, czy i w jakim stopniu zastosowanie analizy modalnej może być skuteczne w kontekście wykrywania zmian w połączeniach. Aby wyselekcjonować mierzalne wartości, które wykazują największą wrażliwość na intencjonalne i kontrolowane zmiany sztywności połączeń w węzłach Autorka wykorzystuje analizę wrażliwości oraz modele numeryczne. Symulacje komputerowe Autorka wykonuje w komercyjnym oprogramowaniu ADINA za pomocą prostego przestrzennego modelu belkowego ramy. Na podstawie przeprowadzonych analiz Autorka określiła m.in. optymalne rozmieszczenie czujników (do poprawnego wyznaczenia najważniejszych postaci w płaszczyźnie ramy) i następnie wykonała pomiary.

Badania dynamiczne, przedstawione przez Autorkę w rozdziale 3, okazały się skutecznym narzędziem umożliwiającym wykrywanie zmian w połączeniach, są jednak niewrażliwe na bardzo małe zmiany.

Wykazano, że niezależnie od wybranych parametrów dynamicznych wykorzystanych do detekcji zmian w połączeniach, uszkodzenia w postaci poluzowania pojedynczego rzędu śrub pozostały niewykrywalne. Dopiero w przypadku równoczesnego luzowania łączników w dwóch połączeniach, możliwe było prawidłowe wykrywanie uszkodzeń we wszystkich analizowanych przypadkach. Autorka podsumowuje, że prawidłowe określenie lokalizacji uszkodzenia na podstawie częstotliwości i postaci drgań swobodnych nie przekraczało 90%, a prawidłowe określenie typu anomalii nie było niemożliwe. W odróżnieniu od pomiaru drgań z analizą modalną, wykorzystanie wyłącznie FRF okazało się najbardziej efektywną techniką pod względem wymaganego sprzętu i pracochłonności. Bazując na FRF, wystarczające okazały się pomiary przy pomocy wyłącznie jednego czujnika siły i jednego czujnika przyspieszeń, zlokalizowanego w dowolnym węźle. Dlatego Autorka w podsumowaniu rekomenduje pomiar FRF jako podstawową metodę stosowaną do wykrywania uszkodzeń w węzłach.

Rozdział 4 niniejszej pracy budzi najwięcej wątpliwości i niepokoju, ponieważ zaprezentowane w nim badania w dużej części były już przedstawione w pracy: „D. Ziaja, B. Turon, B. Miller. Detection of anomaly in a pretensioned bolted beam-to-column connection node using digital image correlation and neural networks. Applied Sciences, 10(7):2400, 2020”. Autorka nie cytuje ani powyższej pracy, ani żadnych grafik, ilustracji czy równań w niej zawartych (choć wiele z nich jest bardzo podobnych). Włączanie do rozprawy doktorskiej materiałów już opublikowanych, nawet jeżeli Autorka jest ich współautorem, nie jest dobrym zwyczajem, ponieważ budzi to wątpliwość o procentowy wkład Autorki w powstanie tej pracy (rzadko wynosi on 100%) i ewentualne prawa autorskie do prezentowania zawartych w niej wyników. Zakładam jednak, że w tym przypadku przeważyły kwestie związane z nadchodzącą wielkimi krokami ewaluacją jednostek naukowych, co w pewnym stopniu może tłumaczyć decyzje Autorki i jej Promotora.

We wspomnianym rozdziale 4 Autorka przedstawia propozycję procedury wykrywania zmian w jednym z połączeń na podstawie obserwacji przemieszczeń wybranych punktów na powierzchni średnicy rygla (w sąsiedztwie wybranego połączenia) na skutek wymuszenia harmonicznego. Wykorzystanie osobno informacji o poziomym lub pionowym przemieszczeniu pojedynczego punktu umożliwiło prawidłowe wykrywanie uszkodzenia maksymalnie w 80% badanych przypadków. Wzbogacenie danych pomiarowych (dzięki zastosowaniu DIC) o kąt obrotu osi pręta, umożliwiło wzrost skuteczności procedury do 100% w przypadku wykrywania anomalii, do 95% w określeniu jej rozmiaru (jeden czy dwa rzędy rozkręconych śrub) i do 94% w przypadku określenia typu anomalii. Warto podkreślić, że liczba fałszywych alarmów była w tym przypadku niższa od 1%. Autorka w podsumowaniu wykazuje wady i zalety zastosowania bezkontaktowych pomiarów pól przemieszczeń. Do najważniejszych wad zalicza fakt, że zastosowanie DIC w badaniach polowych wiąże się z koniecznością przeprowadzenia wielu testów. Do zalet natomiast fakt, że może być z powodzeniem stosowana do monitorowania tych części konstrukcji, które są trudno dostępne, eliminację problemu zasilania czujników oraz brak konieczności montowania kabli co pozwala uniknąć wpływu długości kabla na jakość rejestrowanego sygnału.

W rozdziale 5 Autorka prezentuje oryginalną procedurę łączącą lokalne podejście do określenia globalnego stanu połączeń sprężonych w konstrukcji co umożliwiło prawidłową klasyfikację wszystkich analizowanych wzorców zarówno w odniesieniu do zadania wykrywania, określenia lokalizacji, jak i typu uszkodzenia. Autorka udowadnia, że detekcja uszkodzeń na podstawie pomiarów propagacji fali sprężystej jest bardzo czuła na zmiany występujące w układzie. Zauważono jednak, że dzięki obserwacjom propagacji fali można skutecznie wykryć uszkodzenia z ograniczeniem do zastosowań lokalnych (uszkodzenia w obrębie elementów, w których wzbudzona i mierzona jest fala). W podsumowaniu Autorka sugeruje, że przed zastosowaniem prezentowanej metody do zadań monitorowania rzeczywistych konstrukcji należy sprawdzić ich skuteczność w sytuacji równoczesnego

wystąpienia uszkodzeń w kilku węzłach, a także wpływu innego rodzaju uszkodzeń na przebieg fali sprężystej. Autorka udowadnia że stosowanie fal sprężystych w badaniach nieniszczących do lokalnej oceny stanu fragmentów konstrukcji można rozszerzyć, poprzez zastosowania sztucznej inteligencji do wnioskowania o globalnej kondycji całego układu.

Przeprowadzone studia literaturowe pozwoliły Autorce postawić ambitne cele do rozwiązania, nie tylko na drodze badawczej, ale także na drodze rozważań teoretycznych jak również analiz wspomaganych numerycznie. Świadczy to o bardzo dobrym rozpoznaniu przez Autorkę tematyki i o Jej dobrym przygotowaniu do samodzielnego prowadzenia eksperymentów badawczych oraz podstawowych analiz numerycznych.

W rozprawie Autorka jasno sformułowała cele, które starała się konsekwentnie realizować. Choć proporcje pomiędzy objętościami poszczególnych rozdziałów można uznać jako dyskusyjne, to jednak uważam, że założone cele Autorka zrealizowała bardzo skutecznie. Pragnę również dodać, że tytuł rozprawy dobrze koresponduje z zawartą w niej treścią.

Zrealizowane przez Autorkę badania i przeprowadzone analizy są oryginalne. Zostały one zaprogramowane właściwie z punktu widzenia założonych celów. Widoczna jest duża staranność Autorki w przeprowadzaniu zaplanowanych eksperymentów i graficznym udokumentowaniu uzyskanych wyników. Analiza i interpretacja tych wyników zostały przeprowadzone prawidłowo.

4. UWAGI KRYTYCZNE I DYSKUSYJNE

4.1. Strona merytoryczna

W trakcie lektury analizowanej rozprawy doktorskiej nie zauważyłem znaczących uchybień merytorycznych. Autorka rozwiązała postawione sobie zadania naukowe, polegające na krytycznym porównaniu trzech różnych technik pomiarowych zastosowanych do tej samej konstrukcji, co pozwoliło sprawdzić użyteczność każdej z nich, wskazując jednocześnie ich wady i zalety. Wykazała się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami prowadzenia badań doświadczalnych oraz umiejętnościami rozwiązywania problemów teoretyczno-numerycznych.

Zaprezentowana praca stanowi interesujące porównanie stosowalności i skuteczności różnych metod pomiarowych do identyfikacji uszkodzeń w węzłach ramy portalowej. Zabrakło jednak w pracy, moim zdaniem, szerszego spojrzenia na wykorzystywane metody i algorytmy, a także bardziej praktycznego zestawienia zastosowanych metod. Niedosyt budzi również brak próby identyfikacji kilku uszkodzeń jednocześnie; brak dyskusji dot. wpływu elementów konstrukcyjnych stężających konstrukcję w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ramy; ograniczenie pracy tylko do kontrolowanych przypadków laboratoryjnych; i systematyczne upraszczanie rozwiązywanych zagadnień bez próby znalezienia alternatywnych konfiguracji. Nie znalazłem też w pracy motywacji wyboru anomalii W0 i GD w analizach prezentowanych w rozdziale 3, a nie np. G2 lub D2, co wydaje się, moim zdaniem, bardziej logicznym (intuicyjnym) wyborem.

4.2. Strona redakcyjna

W trakcie lektury analizowanej rozprawy doktorskiej zauważyłem drobne usterki redakcyjne, które przedstawiam poniżej.

- a) Rozdział 1, strona 34 („...dla każdego punktu z osobna.” powinno być „...osobno dla każdego punktu.”);

- b) Rozdział 1.4, strona 49 („...z osobiście przeprowadzonych eksperymentów.” powinno być „(,...z samodzielnie przeprowadzonych eksperymentów.”);
- c) Rys. 2.2. do złudzenia przypomina rysunek wykorzystany w pracy „D. Ziąja, B. Turon, B. Miller. Detection of anomaly in a pretensioned bolted beam-to-column connection node using digital image correlation and neural networks. Applied Sciences, 10(7):2400, 2020”. Proszę o komentarz;
- d) Rozdział 2.3. Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie wszystkich kryteriów zatrzymania procesu uczenia SNN z wykorzystaniem algorytmu Levenberg’a-Marquardt’a, czym na przykład jest μ i w jaki sposób wykorzystane jest w wybranym algorytmie?
- e) Rozdział 2.3. Proszę o szersze wyjaśnienie (opis) wykorzystanych funkcji aktywacji w SNN;
- f) Rozdział 3.1. strona 57 („...metodą pomiarową był pomiar” brzmi, moim zdaniem, dziwnie);
- g) Rozdział 3.2. strona 58. Proszę o motywację wyboru zastosowanego elementu skończonego i doprecyzowanie z ilu węzłów oraz stopni swobody zbudowany jest wykorzystany model numeryczny ramy;
- h) Rozdział 3.2.3. Przedstawione krzywe na Rys. 3.9 – 3.14 powinny, moim zdaniem, być ograniczone w przedziale $k \in (0,1e7)$ lub powinna być zastosowana inna skala na osi pionowej;
- i) Rozdział 3.2.4. Przedstawione krzywe na Rys. 3.15 i 3.16 powinny, moim zdaniem, być ograniczone w przedziale $k \in (0,1e7)$ lub powinna być zastosowana inna skala na osi pionowej;
- j) Rozdział 3.2.4. W pracy nie znalazłem wzoru wykorzystanego do wyznaczenia wrażliwości, czy i ewentualnie jak wielkości były normalizowane? Jak liczono pochodną, jaka była przyjęta wartość perturbacji Δk ?
- k) Rozdział 3.2.4. strona 79. Co to jest „przyrost pochodnej” i co oznacza „najbardziej wrażliwe przemieszczenia”?
- l) Rozdział 3.4. strona 84. Co Autorka ma na myśli pisząc: „...niewspomnianych tutaj parametrów.”?
- m) Rozdział 3.4. strona 84 („...wykorzystanych grup parametrów z osobna” powinno być „...osobno dla wykorzystanych grup parametrów”);
- n) Rozdział 3.4.2. („Wykrywanie zamian...” powinno być „Wykrywanie zmian...”);
- o) Rozdział 3.4.3. Stwierdzenie „(porównaj rozdział 3.2.4)” nie jest moim zdaniem poprawne;
- p) Rozdział 3.4.3. („...w powiększeniu FRF...” może lepiej: „w innej skali...”);
- q) Rysunek 3.28 („w powiększeniu” - patrz komentarz ‘p’);
- r) Rozdział 3.5 strona 95. Mam wątpliwość czy do oceny jakości wyuczonej sieci można stosować średnią z dwóch zbiorów (uczenie + testowanie) – proszę o komentarz;
- s) Rozdział 3.6. Proszę o umotywowanie wyboru (dot. ograniczenia) zbioru uszkodzeń do przypadków WO i GD – moim zdaniem, bardziej intuicyjny jest wybór G2 i D2;
- t) Rozdział 4. Większość rysunków i wzorów można znaleźć w pracy: „D. Ziąja, B. Turon, B. Miller. Detection of anomaly in a pretensioned bolted beam-to-column connection node using digital image correlation and neural networks. Applied Sciences, 10(7):2400, 2020”. Proszę o wyjaśnienie dlaczego praca (ani żadna jej część, tj. rysunki, wzory, wyniki) nie zostały zacytowane w dysertacji?
- u) Rysunek 5.1. („...ofpowiednich...” powinno być „...odpowiednich...”);
- v) Rozdział 5.3. strona 126 („...skupiono się wyłącznie analizie” brakuje „na”);
- w) Rozdział 5.5. Czy zdanie: „Z powodzeniem można uznać ją za bardzo czułą na zmiany występujące w układzie - analizowane uszkodzenia pozostawały niezauważalne” jest poprawne? Druga część zdania zaprzecza pierwszej.
- x) Rozdział 6. („...najbardziej rokującą spośród...” może po prostu „...najlepszą spośród...” ?);

- y) Rozdział 6. Czy Autorka rozważa przeanalizowanie ramy z uwzględnieniem połączeń poprzecznych pomiędzy ramami (płatwie, rygle). Samotne ramy są rzadkim zjawiskiem w praktycznej przestrzeni inżynierskiej;
- z) Rozdział 6. Czy autorka rozważa/planuje przenieść swoje prace z laboratorium na rzeczywiste konstrukcje?

Wymienione wyżej uwagi krytyczne i dyskusyjne nie mają większego znaczenia dla ogólnie wysokiej oceny recenzowanej rozprawy. Uwagi te podałem z nadzieją, że jeśli Autorka planuje opublikować wybrane fragmenty tego dzieła (może za wyjątkiem rozdziału 4) to zechce, być może, je uwzględnić.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Opiniowana rozprawa doktorska mgr inż. Dominiki Ziaji udanie rozwiązuje postawione oryginalne zadanie naukowe (o praktycznych walorach inżynierskich) dotyczące efektywności wykrywania kontrolowanych uszkodzeń w węzłach konstrukcji z wykorzystaniem badań nieniszczących.

Wytyczone w rozprawie cele zostały osiągnięte. Wyciągnięte zostały też prawidłowe wnioski. Autorka pracy wykazała się bardzo dobrą znajomością aktualnego stanu wiedzy w zakresie objętym tematem, umiejętnościami prowadzenia zaawansowanych badań doświadczalnych oraz umiejętnościami wyciągania konstruktywnych wniosków z badań. Otrzymała oryginalne wyniki, które przeanalizowała i krytycznie oceniła. Świadczy to o predyspozycjach Autorki do samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych. W trakcie opracowywania postawionego problemu naukowego Autorka nie ustrzegła się jednak przed drobnymi niedociągnięciami, które w postaci uwag krytycznych zostały przedstawione w rozdziale 4 niniejszej recenzji.

Pomimo uwag opiniowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi istotny wkład w rozwój wiedzy w dyscyplinie naukowej Inżynieria Lądowa i Transport w zakresie szeroko rozumianej mechaniki i monitorowania stanu technicznego konstrukcji. Oprócz znaczenia naukowego opiniowana rozprawa ma również duże znaczenie dla praktyki inżynierskiej.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, iż recenzowana rozprawa spełnia wymogi odnośnie prac doktorskich zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tj. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789) oraz Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018, poz. 261) i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

