

Uniwersytet Pedagogiczny  
im. Komisji Edukacji Narodowej  
Instytut Nauk Technicznych  
ul. Podchorążych 2  
30-064 Kraków

## **RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**mgr inż. Dominiki Ziaji**

**pt.: *Wykrywanie zmian w węzłach konstrukcji z wykorzystaniem badań nieniszczących***

**Promotor rozprawy: dr hab. inż. Bartosz Miller, prof. PRz**

**Promotor pomocniczy rozprawy: dr hab. inż. Piotr Nazarko, prof. PRz**

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Recenzję opracowałam na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Inżynieria Lądowa i Transport na Wydziale Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury Politechniki Rzeszowskiej z dnia 9 grudnia 2020 roku oraz pisma jej przewodniczącego prof. dr hab. inż. Tomasza Siwowskiego z dnia 14 grudnia 2020r.

### **2. Ogólna charakterystyka i ocena rozprawy**

Wiodącym celem naukowym recenzowanej rozprawy doktorskiej była analiza i ocena przydatności łącznego zastosowania wybranych nieniszczących metod pomiarowych i sztucznych sieci neuronowych (jako narzędzi wnioskowania) do identyfikacji ewentualnych zmian w konstrukcji. Autorka skupiła się na wykrywaniu uszkodzeń w połączeniach (węzłach) konstrukcji ramowej. Rozważany problem jest ściśle powiązany z monitorowaniem stanu konstrukcji. Jest więc szczególnie istotny w przypadku konstrukcji budowlanych i kontrolowania ich stanu technicznego. Zatem podjęcie przez Doktorantkę badań z tego zakresu należy uznać za uzasadnione i potrzebne. Tematyka badań jest ważna i aktualna.

Treść rozprawy zawarta jest na 189 stronach i podzielona na 6 rozdziałów, spis rysunków i tabel, bibliografię oraz załącznik z danymi wykorzystanymi w rozdziale 3. Opracowanie obejmuje też streszczenie w języku polskim i angielskim. Tytuł rozprawy prawidłowo odzwierciedla jej treść.

W rozdziale pierwszym Doktorantka krótko scharakteryzowała i uzasadniła podjętą problematykę, sformułowała cel rozprawy oraz podała jej zakres. Przedstawiła również tezę naukową rozprawy: „*Nieniszczące metody badań w połączeniu z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych pozwalają na diagnozowanie połączeń śrubowych analizowanej*

*konstrukcji w zakresie wykrywania i lokalizacji uszkodzeń*". Poza tym, rozdział pierwszy zawiera też bardzo obszerny (obejmuje 40 stron), szczegółowy przegląd aktualnego stanu wiedzy związanej z tematem pracy. Źródła uporządkowane i pogrupowane według zagadnień, którymi Autorka zajmuje się w kolejnych częściach pracy, są starannie omawiane.

Rozdział drugi przedstawia ogólną strategię i algorytm badań dotyczących wykorzystania trzech nieniszczących metod pomiarowych (pomiar drgań, dwuwymiarowa cyfrowa korelacja obrazu, wzbudzenie i rejestracja propagacji fali sprężystej) oraz wnioskowania z użyciem sztucznych sieci neuronowych do wykrywania zmian w śrubowych połączeniach w modelu laboratoryjnym dwukondygnacyjnej ramy stalowej. Rozdział zawiera opis wykonanego modelu oraz wariantów wprowadzanych uszkodzeń. Przedstawia również ideę i proponowaną przez Autorkę procedurę jedno- lub wielostopniowego wykorzystania jednokierunkowych sztucznych sieci neuronowych ze wsteczną propagacją błędu.

Rozdziały trzeci, czwarty i piąty należy uznać za najważniejsze części rozprawy. Prezentują one oryginalne wyniki badań Doktorantki.

Rozdział trzeci dotyczy detekcji uszkodzeń na podstawie pomiarów drgań. Przetworzenie danych pomiarowych pozwoliło na przygotowanie różnych wersji wektorów wejściowych sieci neuronowych bazujących na trzech grupach danych: częstotliwościach drgań, postaciach drgań, funkcjach odpowiedzi częstotliwościowej. Warto z uznaniem podkreślić, że planowanie eksperymentu do detekcji zmian sztywności połączeń ramy (m. in. rozmieszczenie czujników) Doktorantka poprzedziła bardzo staranną, szczegółową analizą teoretyczną. Symulacje numeryczne z użyciem metody elementów skończonych pozwoliły na analizę wrażliwości parametrów dynamicznych na pojawiające się zmiany w węzłach.

Kolejną propozycję zastosowania sztucznych sieci neuronowych w wykrywaniu zmian sztywności połączenia w konstrukcji ramy przedstawiono w rozdziale czwartym. Bazuje ona na danych pomiarowych uzyskanych przez Autorkę metodą dwuwymiarowej cyfrowej korelacji obrazu.

Rozdział piąty prezentuje rezultaty neuronowej detekcji zmian w konstrukcji na podstawie danych z pomiarów propagacji fali sprężystej. Przygotowanie parametrów wejściowych sieci neuronowych poprzedzone zostało analizą i przetworzeniem zarejestrowanych sygnałów poprzez filtrację, transformację Fouriera, krótkookresową transformację Fouriera, wybór odpowiednich okien czasowych. Dodatkowo, Autorka zaproponowała też obróbkę danych wejściowych za pomocą analizy składników głównych.

W ostatnim, szóstym rozdziale zamieszczono ogólne podsumowanie i wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Wskazano również kierunki dalszych prac.

Warto podkreślić i docenić fakt, że wzorce wykorzystane we wszystkich obliczeniach z użyciem sztucznych sieci neuronowych bazowały na wynikach badań doświadczalnych skrupulatnie zaplanowanych i wykonanych przez Autorkę. Uwagę zwraca bardzo szeroki zakres przeprowadzonych obliczeń. Tak liczne testy numeryczne związane z analizą efektywności sieci z różnymi wariantami parametrów wejściowych, różną architekturą,

tworzeniem złożonych układów sieci (tzw. sieci wielopoziomowych), wymagały ogromnego nakładu pracy.

Bibliografia jest wyjątkowo obszerna – liczy aż 289 pozycji, w tym osiem prac współautorskich Doktorantki (Doktorantka jest pierwszym autorem w sześciu z nich). Autorka bardzo dokładnie rozeznała literaturę przedmiotu. Skupiła się głównie na pracach najnowszych: zagranicznych i polskich. Drobne usterki w danych bibliograficznych niektórych źródeł przedstawiłam w dalszej części recenzji.

Praca jest starannie zredagowana. Zagadnienia przedstawiane są bardzo krótko, syntetycznie, ale jasno, czytelnie i precyzyjnie.

Uważam, że oryginalnym, najważniejszym efektem naukowym rozprawy jest:

- weryfikacja skuteczności procedury wykrywania oraz lokalizacji zmian sztywności węzłów konstrukcji ramy, bazującej na powiązaniu różnych nieniszczących metod pomiarowych z sieciami neuronowymi,
- porównanie przydatności trzech różnych technik pomiarowych (pomiar drgań, metoda cyfrowej korelacji obrazu, rejestracja fali sprężystej) do tworzenia wzorców do neuronowej diagnostyki konstrukcji oraz ocena ich zalet i ograniczeń w tym zakresie,
- krytyczna analiza przydatności poszczególnych parametrów dynamicznych w wektorach wejściowych sieci neuronowych i wykazanie, że funkcja odpowiedzi częstotliwościowej jest parametrem, który pozwala na efektywne wykrywanie uszkodzeń przy stosunkowo najmniejszym wysiłku pomiarowym,
- zaprojektowanie pojedynczych i kaskadowych sieci neuronowych z różnymi wariantami wektorów wejściowych do wnioskowania o ewentualnej zmianie sztywności węzła ramy i lokalizacji takiej anomalii,
- opracowanie koncepcji kaskadowej sieci neuronowej, która pozwala na ocenę stanu połączeń w całej konstrukcji (stanu globalnego) poprzez skojarzenie ze sobą odrębnie diagnozowanych stanów lokalnych (np. z użyciem rejestracji fali sprężystej).

### **3. Uwagi do rozprawy**

#### **3.1. Uwagi do dyskusji, pytania do Autorki**

- Podczas badań doświadczalnych przeprowadzonych przez Doktorantkę zmiana sztywności połączeń w węzłach ramy realizowana była poprzez skręcanie albo rozkręcanie połączeń śrubowych w wielu różnych wariantach. Tymczasem dokładność uzyskania określonego momentu dokręcenia śrub przy pomocy klucza dynamometrycznego wynosi około 50% a stopień luzowania łączników nie był kontrolowany w prowadzonych badaniach (jako kryterium przyjęto stan, „w którym poluzowanie nie jest widoczne gołym okiem”). Dodatkowo, w badaniach eksperymentalnych praktycznie trudno jest osiągnąć powtarzalność w tym zakresie. Można przypuszczać, że rzeczywiste, faktyczne luzowanie łączników mogło mieć pewien wpływ na uzyskiwaną dokładność identyfikowania uszkodzenia oraz na to, że niektóre z uszkodzeń były „łatwiejsze” do wykrycia niż inne. Tak więc może nie tylko skala

symulowanego uszkodzenia (tzn. poluzowany jeden rząd albo dwa rzędy śrub), ale też „skala” rozkręcenia jest tu ważna? W skrajnym przypadku, niektóre połączenia uważane za połączenia bez uszkodzenia mogły się tylko znikomo różnić od tych poluzowanych.

- W przypadku użycia wyników pomiarów drgań jako informacji wejściowej sieci neuronowych do detekcji zmian sztywności połączeń w badanej konstrukcji ramowej Doktorantka zdecydowała się na to, aby „... parametry z różnych grup nie mieszały się w ramach jednego wektora wejściowego ...” (str. 57, p. 3.1, 2-gi akapit). Stąd w wektorach wejściowych proponowanych sieci tzw. pierwszego poziomu są elementy wynikające albo z częstotliwości drgań, albo z postaci drgań, albo z funkcji odpowiedzi częstotliwościowej. Jednocześnie jednak Autorka np. stwierdza (str. 103, p. 3.6, 2-gi akapit): „Podejmowanie decyzji o stanie układu wyłącznie na podstawie uszeregowanych w kolejności rosnącej częstotliwości, pomijając porównanie podobieństwa form może być ryzykowne ...”. Dlaczego zatem nie podjęto choćby wstępnej próby konstrukcji pojedynczej sieci neuronowej albo zestawu sieci (sieci wielopoziomowej) z wektorami wejściowymi w których znalazłaby się skojarzona informacja o parametrach z różnych grup.
- W przypadku neuronowego wnioskowania o stanie konstrukcji bazującego na pomiarach dynamicznych jedną z propozycji było wykorzystywanie do projektowania sieci neuronowych wzorców, które uwzględniają wyłącznie uszkodzenia łączników w dwóch rzędach (oznaczone w pracy jako GD, WO). Konsekwencją tego jest oczywiście zmniejszenie liczby dostępnych wzorców, a co za tym idzie, ewentualne ograniczenia w doborze architektury sieci. Naturalną możliwością uzupełnienia/zwiększenia liczby wzorców byłoby uwzględnienie w badaniach kolejnych przypadków (oznaczone w pracy jako G2 i D2).
- Doktorantka wykonywała staranne analizy, które pozwalały na optymalizację architektury każdej z proponowanych sieci w zakresie doboru liczby neuronów w warstwie ukrytej. Odpowiednie wykresy przedstawiła w pracy. Jednak w wielu przypadkach sieci proponowanych w rozdziale 3 (Rozdział 3: Detekcja zmian na podstawie pomiarów dynamicznych) brakuje informacji o końcowej decyzji. Konkretnie liczby neuronów w warstwie ukrytej podane są w tekście rozdziału tylko dla niektórych przypadków. Wydaje się, że pełna informacja mogłaby się np. znaleźć w tabelach 3.3 ÷ 3.8. Warto zauważyć, że problem ten nie występuje w rozdziałach 4 i 5 – w nich informacja dotycząca warstwy ukrytej jest wyczerpująca.
- Dlaczego wartości sztywności  $k_6$  i  $k_8$  przyjęte dla modelu nazwanego „MODEL 1” (str. 81,  $k_6 = k_8 = 5.3774e6$  Nm/rad) są większe niż wzięte do obliczeń w modelu bazowym „MODEL 0” (str. 61,  $k_6 = k_8 = 4e5$  Nm/rad). Wydaje się, że wartości tych sztywności w MODELu 1 powinny być raczej zredukowane w stosunku do wartości w MODELu 0.
- Interesujące byłoby wyjaśnienie/komentarz dlaczego w pomiarach dynamicznych Doktorantka nie wykorzystwała wszystkich dostępnych kanałów rejestratora (wykorzystano 34 na 40 dostępnych).

- Dlaczego do badań eksperymentalnych z użyciem metody cyfrowej korelacji obrazu wytypowano węzeł PD (dolny po prawej stronie)? W tekście rozprawy brakuje choćby krótkiego uzasadnienia wyboru tego węzła.

### 3.2. Uwagi szczegółowe

- Na str. 27, w objaśnieniu oznaczeń pod wzorem (1.3) jest błąd. Powinno być  $\{q_a(\Omega_e)\}$ , a nie  $\{q_a(\Omega_p)\}$ .
- Na str. 31, pod równaniem (1.5) brakuje wyjaśnienia oznaczenia bardzo istotnego parametru  $h$  ( $h = \frac{d}{2}$ , gdzie:  $d$  – grubość elementu/płyty).
- W prawej stronie równania (1.7) (str. 31) jest błąd. Nawias w mianowniku powinien być podniesiony do kwadratu.
- Przed wyrażeniem („ułamkiem”) po prawej stronie równania (1.8) (str. 31), brakuje znaku minus.
- Na rys. 3.5 + 3.8, według ich tytułów, przedstawiono kolejne postacie drgań własnych modelu bazowego i podano wartości częstotliwości drgań własnych. Jednak zgodnie z danymi z tabeli 3.1, niektóre z wartości tych częstotliwości odpowiadają modelowi odniesienia (a więc ze sztywnymi połączeniami), a nie modelowi bazowemu (dotyczy:  $f_3, f_4, f_6, f_7, f_{10}, f_{11}, f_{13}, f_{15}, f_{16}, f_{18}, f_{19}, f_{20}$ ). Wskazany byłoby wyjaśnienie.
- Na str. 109 (p. 4.4, 2-gi akapit) napisano, że proces uczenia powtórzono 30 razy. Takie stwierdzenie można też znaleźć w pracy [286], która dotyczy zagadnienia przedstawianego w p. 4.4 i której Doktorantka jest współautorką. Tymczasem z każdej z trzech części (a, b i c) rys. 4.4 wynikałoby, że tych powtórzeń było 50. Ze względu na to, że wyniki przedstawione w [286] są identyczne jak w rozprawie doktorskiej, potrzebne byłoby rozstrzygnięcie tej sprzeczności.
- Wydaje się, że na str. 61 nie podano właściwej (pełnej) wartości  $k_2 = k_4$ . Na str. 61 jest  $k_2 = k_4 = 1.e7Nm/rad$ , a z rys. 3.11 i rys. 3.12 wynikałoby, że  $k_2 = k_4 = 1.7e7Nm/rad$ .
- W 7-mej linii na str. 72 prawdopodobnie wkradł się błąd. Nie jest możliwe aby chodziło o sztywność obrotową połączenia która, jak napisano, „nie będzie większa niż około  $5e7 Nm/rad$ .” Z rys. 3.14 wynikałoby, że powinno tu być  $0.5e7 Nm/rad$ , a nie  $5e7 Nm/rad$ .
- W spisie literatury w pozycji [206] prawidłowo podano, że jednym z autorów jest Tomasz Rusin, natomiast na str. 19 (4-ta linia od góry) jest „Rusinek i Kopernik wykorzystali ... [206].” zamiast „Rusin i Kopernik wykorzystali ... [206].”
- Na str. 15 pojawiają się skróty nazw materiałów kompozytowych (CFRP, GFRP), które nie zostały „rozszyfrowane” w pracy.

### 3.3. Uwagi redakcyjne

Podczas lektury ocenianej pracy dostrzegłam pewne niedociągnięcia natury redakcyjnej:

- W niektórych (nielicznych) pozycjach literatury brakuje pełnych danych bibliograficznych, np. w [170, 204, 223, 242, 273].
- W przypadku artykułu [277] w Bibliografii zamiast pełnych danych bibliograficznych (vol. 19, issue 1, 105-122, 2020r.) podany został tylko fragment numeru DOI.
- Brakuje konsekwencji w formacie niektórych pozycji Bibliografii. Z reguły podawana jest pierwsza litera imienia i nazwisko autora, ale np. w [242] jest całe imię autora. Przeważnie nazwa czasopisma występuje bez skrótów, ale np. w [48, 66, 158, 232] wyjątkowo użyto skróconej wersji.
- Tekst p. 1.3.3 ÷ p. 1.3.8 podzielono na części, którym nadano tytuły (bez numeracji), ale tylko w przypadku p. 1.3.8 te tytuły zamieszczono również w Spisie treści. Wydaje się, że warto było konsekwentnie pominąć je w Spisie treści.
- str. 36, 37  
Na rys. 1.1a współrzędne punktu oznaczone są jako  $\{x_1^N, x_2^N\}$ , a w tekście  $\{x_1^n, x_2^n\}$  – brak zgodności. Analogiczna uwaga dotyczy rys. 1.1b.
- Rys. 3.17 (część dotycząca przemieszczeń poziomych) jest nieco „przycięty”. Podobna uwaga dotyczy rys. 3.18 (część dotycząca przemieszczeń pionowych).
- Na rys. 3.21 i rys. 3.22, a także w tekście pracy w nazwach modeli 0, 1, 2 używane są tylko duże litery (MODEL 0, MODEL 1, MODEL 2), a w podpisach pod rysunkami są litery duże i małe w tych nazwach – brak konsekwencji.
- str. 84, rys. 3.23b  
Lepiej byłoby użyć języka polskiego do opisu punktu nr 8 (jest: „8 – excitation point”).
- str. 148, [39]  
Jest: ... the case of the s. pietro bell-tower in perugia ..., powinno być (duże litery): ... the case of the S. Pietro bell-tower in Perugia ... .
- str. 161, [173]  
Pozostawione „w” na końcu linii.
- W spisie literatury w pozycji [205] są dwa przecinki zamiast jednego.

#### Tzw. „literówki”:

- str. 5, p. 1.1, 2-gi akapit, 4-ta linia  
Jest: ... jaki i w trakcie ..., powinno być: ... jak i w trakcie ... .
- str. 17, ostatnia linia  
Jest: ... dielektrycznych ..., powinno być dielektrycznych.
- str. 26, 2-gi akapit od dołu  
Jest: Frequency Responce Function, powinno być: Frequency Response Function.
- str. 28, 3-cia linia od dołu  
Jest: ... paca [40] ..., powinno być: ... praca [40] ... .
- str. 43, 3-ci akapit, 1-sza linia  
Jest: ... jaki ..., powinno być: ... jak ... .
- str. 118, rys. 5.1  
Jest: ... ofpowiednich ..., powinno być: ... odpowiednich ... .
- str. 124, rys. 5.11 (tytuł)  
Jest: ... wybrangeo ..., powinno być: ... wybranego ... .
- str. 129, p. 5.5, 1-szy akapit, 2-ga linia

Jest: ... prawidłową klasyfikację ..., powinno być: ... prawidłową klasyfikację ... .

- str. 155, [116]

Jest: Gołdyn, a powinno być: Gołdyn.

#### 4. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Dominiki Ziaji przedstawia oryginalne rezultaty badań naukowych związanych z ważnym i aktualnym problemem z zakresu zastosowania badań nieniszczących do wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych. Autorka swobodnie porusza się w obszarze wiedzy związanej z dynamiką konstrukcji. Dotyczy to zarówno strony teoretycznej, jak i praktycznej, w szczególności związanej z analizą oraz przetwarzaniem wyników badań doświadczalnych. Doktorantka wykazała się umiejętnością starannego, bazującego na wnikliwej analizie teoretycznej, zaplanowania, zorganizowania i przeprowadzenia badań doświadczalnych z użyciem pomiarów dynamicznych, analizy propagacji fali sprężystej oraz cyfrowej korelacji obrazu. Jednocześnie udowodniła biegłe opanowanie zaawansowanych technik obliczeniowych (w szczególności sztucznych sieci neuronowych i metody elementów skończonych). Wykazała się umiejętnością prowadzenia badań naukowych, których wyniki pozwoliły na przedstawienie w pracy oryginalnych propozycji łącznego wykorzystania badań doświadczalnych i sztucznych sieci neuronowych do diagnostyki uszkodzeń konstrukcji. Ten efekt pracy naukowej mgr inż. Dominiki Ziaji może mieć również znaczenie praktyczne.

Założone przez Autorkę cele pracy zostały osiągnięte, a podstawowa teza pracy wykazana. Kwestie dyskusyjne i nieliczne, drobne uchybienia nie podważają wysokiej oceny rozprawy.

Zdecydowanie stwierdzam, że przedłożona przez Panią mgr inż. Dominikę Ziaję rozprawa doktorska pt.: „Wykrywanie zmian w węzłach konstrukcji z wykorzystaniem badań nieniszczących” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim w *Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r.* (z późniejszymi zmianami). Wnoszę zatem o dopuszczenie Pani mgr inż. Dominiki Ziaji do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

*Krzysztof Kusin*