

plk dr hab. inż. Krzysztof Dragan, prof. ITWL

Warszawa, 10.09.2024 r.

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych  
ul. Ks. Bolesława 6  
01-494 Warszawa

## RECENZJA

pracy doktorskiej magistra inżyniera Nguyen[a] Cong Duc[a] zatytułowanej „Bridge health monitoring using automated FE model updating, signal processing, and machine learning „ (Monitorowanie stanu mostu przy użyciu automatycznej aktualizacji modelu FE, przetwarzania sygnałów i uczenia maszynowego).

### Podstawa prawna:

Recenzja została przygotowana na wniosek Przewodniczącego Rady Wydziału Inżynierii Lądowej, Geodezji i Transportu Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Marcina Stańka - pismo znak RDILGT.512.2024 z dnia 5 lipca 2024 r.

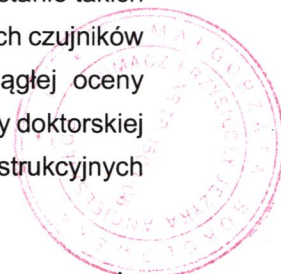
### 1. Ogólna i formalna charakterystyka pracy

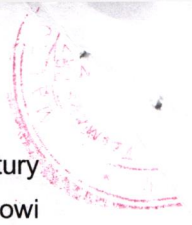
Przewidziana do recenzji praca doktorska koncentruje się na monitorowaniu stanu konstrukcji (ang. Structural Health Monitoring, SHM) struktur wielkogabarytowych, tj. mostów, które są głównymi elementami projektowania w inżynierii lądowej. Konstrukcje takie poddawane są długotrwałemu wpływowi obciążeń cyklicznych, w tym statycznych i zmęczeniowych, a także problemom starzenia związanym z wpływem warunków zewnętrznych (takich jak pogoda) i specyfiką materiałów użytych w konstrukcji. Mając na uwadze również różne warunki funkcjonowania [tego typu konstrukcji] - takie jak tory kolejowe, samochodowe, a także lokalizacje geograficzne, należy wziąć pod uwagę szereg czynników wpływających na ich projektowanie i eksploatację. Prezentowana praca jest próbą opracowania metodologii kwantyfikacji i szacowania rodzajów czynników wpływających na eksploatację mostu, biorąc pod uwagę konieczność monitorowania integralności strukturalnej. Wdrożenie metodologii SHM w przypadku takiej konstrukcji wymaga jednak dogłębnej znajomości jej dynamiki, problemów integralności strukturalnej, które mogą wpływać na taką dynamikę, a także odpowiedniego podejścia do kwantyfikacji takich implikacji strukturalnych. Takie działanie może być możliwe w oparciu o zbieranie danych z czujników strukturalnych umieszczonych na konstrukcji monitorowanego mostu. Oceniana praca doktorska zawiera w rozdziale wprowadzającym odpowiednie pytania dotyczące podstawowych problemów konstrukcyjnych, na które należy odpowiedzieć. Autor podkreśla również w pracy podejście do IOT4+ i kierunku inteligentnego przemysłu, w oparciu o ścieżkę włączenia inteligentnych cyfrowych bliźniaków SHM. Wykorzystanie takich modeli, w tym geometrii strukturalnej, zasilanie systemu strumieniami danych ze zintegrowanych czujników wraz z inteligentnym przetwarzaniem i modelowaniem, może skutkować możliwością ciągłej oceny integralności strukturalnej i prognozyki w długoterminowej eksploatacji. W prezentowanej pracy doktorskiej podkreślono również możliwość zastosowania strategii SHM do oceny właściwości konstrukcyjnych

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Rada Dyscypliny Inżynierii Lądowej,  
Geodezja i Transport

wpłynęło dnia 26.09.2024

nr 200 zat. —





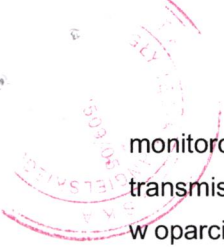
mostów w Polsce i Wietnamie. Praca zawiera oszacowanie specyfiki i wielkości rynku infrastruktury kolejowej i drogowej wraz z obecnością mostów w wyżej wymienionych krajach. Uzasadnienie to stanowi motywację do podjęcia badań. Proponowane badania obejmują opis metodologii stosowanej w SHM dla konstrukcji mostowych, a także podejście do akwizycji sygnałów i oceny danych. W oparciu o przedstawioną metodologię, autor prowadzi badania nad przetwarzaniem sygnałów w połączeniu z podejściem do modelowania dla wybranych konstrukcji. Prezentowana praca łączy mechanikę eksperymentalną, dynamikę inżynierii lądowej, przetwarzanie sygnałów i wykorzystanie nowoczesnego podejścia do analizy danych statystycznych z modelami klasyfikacji danych znanymi jako uczenie maszynowe (ang. Machine Learning).

Przedstawiona do oceny praca doktorska liczy 164 strony, na które składają się podziękowania, streszczenie, spis rycin, spis tabel, wykaz nazewnictwa i skrótów, siedem rozdziałów pracy prezentujących dyskusję i wyniki oraz bibliografia ze 184 cytowaniami. Dodatkowo prezentowana praca zawiera załączniki z następującymi elementami:

- Modele ANN i ANFIS w programie Matlab;
- Modele CNN wspomagane falkami w programie Matlab;
- Modele elementów skończonych w Python/Matlab
- Lista publikacji w temacie pracy doktorskiej.

Prezentowana praca zawiera następującą treść:

- **Rozdział pierwszy**, w którym doktorant bardzo krótko przedstawia podejście do systemów SHM używanych w kilku zastosowaniach w przemyśle. Autor uzasadnia motywację do opracowania wydajnego systemu SHM do monitorowania mostów w oparciu o ustrukturyzowane pytania. Wreszcie, rozdział zawiera ogólny opis planowanej pracy i podkreśla trzy główne kwestie, które należy wziąć pod uwagę w pracy, a są to:
    - Automatyzacja kalibracji modeli FE w celu walidacji parametrów materiałów i sztywności;Wykorzystanie modeli regresji do przewidywania dynamiki konstrukcji na podstawie historii obciążeń;
  - Opracowanie modeli klasyfikacji opartych na architekturze sieci konwolucyjnych dla danych opartych na wibracjach przekształconych za pomocą transformacji falkowej.
- **Rozdział drugi**, w którym autor bardzo krótko przedstawia aktualny stan technologii, a także badania związane z SHM obiektu badanego w pracy. Interesująca dyskusja toczy się w dalszej części rozdziału, w której przedstawiono infrastrukturę transportową dla Rzeczypospolitej Polskiej i Wietnamu. Autor przedstawia krótkie statystyki systemu kolejowego i drogowego, a także odnosi się do już zainstalowanego systemu SHM na mostach. Kolejna część rozdziału prowadzi do krótkiego przeglądu technik i metod przetwarzania sygnałów i uczenia maszynowego dla danych zebranych z systemów SHM. W oparciu o dobrze zorganizowaną analizę przeglądu, autor przedstawia propozycję systemu zarządzania danymi określanego jako inteligentny cyfrowy bliźniak SHM. Jest to interesująca hiperbola do starożytnej chińskiej zasady Yin Yang, którą można zaimplementować w odniesieniu do fizycznego i wirtualnego zasobu danych cyfrowych i informacji wspomaganym modelem. Rozdział kończy się bardzo krótkimi uwagami końcowymi.
- **Rozdział trzeci** przedstawia przegląd rozwiązań sprzętowych wykorzystywanych do gromadzenia danych oraz opis metod przetwarzania sygnałów wykorzystywanych do dalszych badań w ramach prezentowanej pracy. Na wstępie rozdziału, autor krótko przedstawił instrumenty i urządzenia, które są wykorzystywane do zbierania danych konstrukcyjnych z mostów zlokalizowanych w Polsce i Wietnamie. Są to pomiary ugięć, odkształceń i przemieszczeń oraz monitoring drgań. Proponowany system może




monitorować elementy stalowe oraz konstrukcje żelbetowe. Coraz więcej rozwiązań wykorzystuje transmisję danych Wi-Fi. W dalszej części pracy zaprezentowano wprowadzenie do analizy sygnałów w oparciu o transformacje falkowe - przedstawiono definicję transformacji CWT, Morse'a i Morleta. Autor przedstawia wyjaśnienie podejścia do optymalizacji architektury sieci neuronowej w celu wyboru najlepszego rozwiązania dla wydajności klasyfikatorów. Autor przedstawia podejście do metodologii opartej na cechach estymacji danych drgań, takich jak średnia kwadratowa sygnału (ang. Root Mean Square, RMS). W rozdziale przedstawiono opis metodologii optymalizacji sieci do trenowania zestawu danych ze stalowych dźwigarów przęsła wyrażonych przez RMS. W oparciu o podejście z zastosowaniem głębokiego uczenia, funkcje aktywacji, jak również topologia sieci, mogą być optymalizowane za pomocą zaimplementowanego kodu Matlab. Autor przedstawia również architekturę ANFIS, a także krótko charakteryzuje metodę klasyfikacji - las losowy dla obliczonych wskaźników sygnału, takich jak RMS. W rozdziale przedstawiono również ogólną dyskusję dotyczącą wykorzystania CNN wraz z końcowym opisem danych statystycznych wykorzystywanych do oceny dokładności i precyzji dopasowania oraz uczenia modeli regresji i klasyfikacji uczenia maszynowego. Wreszcie, uwagi końcowe podkreślają cechy i wskaźniki oceny wybrane do badania klasyfikacji.

- **Rozdział czwarty**, w którym autor przedstawia podejście do SHM dla mostów opartego na drganiach. Głównym celem tego rozdziału jest przedstawienie metodologii połączonego modelu ANN i ANFIS oraz jego optymalizacji pod kątem ostatecznych wskaźników oceniających wiarygodność modelu w oparciu o redukcję danych wejściowych z wykorzystaniem danych rzeczywistych z prezentowanego obiektu badań. Jako obiekt badań w rozdziale przedstawiono stalowy most łukowy w Dębicy. Główny nacisk położono na monitorowanie stalowych dźwigarów i połączeń spawanych dźwigarów z belkami dwuteowymi oraz z żebrami łukowymi. Autor przedstawia geometrię konstrukcji oraz ograniczenia konstrukcyjne podtorza mostu. Ta część stanowi dobre wprowadzenie do sformułowania opisu procesu akwizycji danych, a także implementacji modelu FE. W dalszej części szczegółowo wyjaśniono rodzaj czujników stosowanych w monitorowaniu drgań i konstrukcji, takich jak akcelerometry, wraz z dokładną lokalizacją czujników. Na podstawie zebranych danych, dyskusja na temat redukcji danych wejściowych, w oparciu o korelację przetworzonych wartości RMS sygnałów, jest wizualizowana jako macierz korelacji. W oparciu o las losowy można określić gradient jednorodności danych i zapewnić separację grup pod względem znaczenia elementów strukturalnych wprowadzonych do zebranej dynamiki. Autor wymienia najważniejsze grupy do dalszych badań, w oparciu o uzyskaną analizę czystości węzłów. Taka analiza jest przedstawiona jako studium przypadku dla dwóch części mostu - przęsła 1 i przęsła 2. Przypadki użycia przedstawiają podejście do modelu redukcji danych w oparciu o wektorowe i skalarnie podejście do analizy danych. Dalsza część pracy koncentruje się na analizie modeli ANN i ANFIS SHM dla przęsła 1 i przęsła 2. Autor przedstawia strategie optymalizacji sieci neuronowej w oparciu o redukcję warstw ukrytych w zależności od liczby wartościowych danych wejściowych. Jako wyniki przedstawiono zestaw wykresów regresji obrazujących przewidywane i rzeczywiste zestawy danych dla zoptymalizowanego modelu. Rozdział zawiera dużą liczbę wykresów regresji dla każdego przypadku, wizualizujących wartości korelacji, a także wykresy linii dopasowania. Jednak takie szczegóły można przedstawić w bardziej zwartej formie, aby łatwiej porównać uzyskane współczynniki regresji. Wreszcie, uwagi podsumowują analizę danych prowadzoną w celach treningowych i analitycznych, a także uzyskane wyniki wydajności.
- **Rozdział piąty** przedstawia podejście do analizy danych pochodzących z mostu kolejowego w Dębicy w oparciu o modele klasyfikacji CNN z wykorzystaniem metodologii falkowej opisanej w rozdziale 3. Rozdział ten stanowi główny trzon pracy, ponieważ przedstawia metodologię oceny stanu konstrukcji

na podstawie zebranych danych historycznych. Przedstawiona metodologia odnosi się do modelowania prowadzonego metodą elementów skończonych dynamiki konstrukcji i szacowania niepewności modelu na podstawie zebranych danych rzeczywistych. Autor definiuje dane statystyczne służące do aktualizacji modelu i na podstawie zebranych danych przedstawia szacowane odchylenie. Na podstawie oszacowania modeli obciążenia i zebranych danych przedstawiono rozkład siły rozciągającej. Porównanie modelu bazowego ze zaktualizowanymi danymi może prowadzić do wniosku o degradacji konstrukcji ze względu na rozbieżność pomiędzy początkowym stanem danych i uzyskanymi danymi rozproszonymi. Na potrzeby klasyfikacji przedstawiono zastosowanie transformacji falkowej. Koncepcja transformacji danych jest dobrze zaadoptowana do prezentacji w postaci dwuwymiarowej tablicy. Następnie cyfrowa reprezentacja takich wartości jest analizowana za pomocą sieci konwolucyjnej. Główną cechą jest identyfikacja stanu zróżnicowania struktury (zdrowa lub uszkodzona), ponieważ orbita grupy danych jest kluczowym wskaźnikiem. Autor przedstawia wystarczającą ilość danych do analizy pomyłek uzyskanych wyników. Analiza jest przeprowadzana dla około 31460 obrazów (224x224 pikseli) podzielonych na dwie kategorie - zdrowe i przeciążone. Na koniec autor przedstawia konkluzje, w których ostateczny wynik został oceniony i odniesiony do ograniczeń związanych z kategoryzacją danych, a także wpływem jakości danych i dokładności modelu.

- **Rozdział szósty** przedstawia wyniki aktualizacji modelu FE. W rozdziale tym przedstawiono podejście do automatycznej aktualizacji modelu FE. Takie działanie jest związane z minimalizacją błędów dla zebranych danych i modelu, co zwiększa precyzję modelu dla predykcji. Konfiguracja obciążenia została przedstawiona w celu wyjaśnienia kolejnych kroków implementacji modelu. Jako przypadek użycia, przedstawiono implementację modelu dla dwóch konstrukcji mostów zlokalizowanych w Wietnamie. Pierwszy scenariusz dotyczy konstrukcji mostu RC. Pierwszy scenariusz wykorzystuje statyczne i dynamiczne testy obciążeniowe oraz korelację z danymi przemieszczeń z systemu LVDT oraz akcelerometrów. Przedstawiono zebrane dane i wyniki modelu w oparciu o konfigurację obciążenia. W oparciu o przedstawioną procedurę z wykorzystaniem algorytmu GA, przedstawiono ostateczne oszacowanie błędu dla modelu. Drugie badanie przedstawia podobny scenariusz obciążenia, który został jednak zastosowany do mostu o konstrukcji stalowo-betonowej. Podobnie jak w pierwszym scenariuszu testowym, model został opracowany i ostatecznie zweryfikowany również pod kątem określenia rozkładu częstotliwości drgań własnych. Na koniec określono aktualizację modelu z wykorzystaniem podejść PSO i GA w odniesieniu do danych początkowych. Prezentowany rozdział przedstawia metodologię kalibracji modelu z dowolną konfiguracją obciążeń przez ciężarówki w oparciu o zebrane dane i opracowany kod. Ponadto przedstawiona metodologia może być stosowana jako deklarowana dla różnych typów mostów, a elastyczność kalibracji modelu może być przenoszona między różnymi typami limitów obciążenia.
- **Rozdział siódmy** przedstawia wnioski i zalecenia dotyczące przyszłych opracowań. Autor krótko podsumowuje uzyskane wyniki na podstawie zebranych danych. Głównym wnioskiem jest udana weryfikacja modelu dla przedstawionych przypadków i zamiar wdrożenia czujników drgań opartych na sztucznej inteligencji. Autor przedstawia również plany przyszłych prac, w których rozważono deklarację wykorzystania uczenia maszynowego opartego na fizyce. Kolejnym krokiem będzie również wdrożenie internetowej aplikacji cyfrowego bliźniaka do zarządzania drganiami i wibracjami w oparciu o dane.
- .Praca doktorska kończy się wykazem cytowanej literatury, kodów, indeksów i publikacji doktoranta.

## 2. Ocena tematu i celu zakresu pracy doktorskiej



Główny cel i główne dążenia pracy zostały podkreślone w rozdziale 1. Główne cele pracy są następujące:

- Zaproponowano zautomatyzowane kalibracje modeli FE w celu aktualizacji sztywności i właściwości materiałowych konstrukcji mostowych przy użyciu zmierzonych odkształceń statycznych i częstotliwości drgań własnych. Studia przypadków obejmują mosty autostradowe w Wietnamie, aby zademonstrować przydatność i skuteczność proponowanych algorytmów aktualizacji modeli FE.
- Modele regresji wspomagane uczeniem maszynowym zostały wykonane w celu przewidywania dynamicznego zachowania przęsła mostu kolejowego pod wpływem różnych zdarzeń. Zbiory danych wykorzystane w modelach predykcyjnych zostały zebrane z opartego na drganiach systemu SHM stalowego mostu łukowego w Dębicy w Polsce w okresie dziewięciu miesięcy od grudnia 2019 r. do września 2020 r.
- Modele klasyfikacji GoogLeNet CNN zostały opracowane w celu przewidywania stanu zawieszenia istniejącego mostu kolejowego przy użyciu obrazów sygnałów opartych na falach i orbitach.

Przedstawiona praca doktorska obejmuje holistyczne podejście do monitorowania integralności strukturalnej konstrukcji inżynierskiej na przykładzie mostów kolejowych. Opisana metodologia składa się z kilku komponentów, które można zintegrować z przyszłymi wymaganiami Przemysłu 4.0, takimi jak cyfrowy bliźniak. Posiadanie informacji strukturalnych o obsługiwanej infrastrukturze daje możliwość śledzenia poszczególnych obiektów, co z kolei umożliwia jej utrzymanie oparte na stanie faktycznym, a także optymalizację kosztów eksploatacji i ewentualnych interwencji. Proponowane prace obejmują część empiryczną związaną z gromadzeniem danych, dynamikę konstrukcji dla skuteczności oceny danych, inżynierię materiałową dla zrozumienia zmęczenia materiału, modelowanie obejmujące mechanikę teoretyczną oraz wykorzystanie analizy danych i klastrowanie z użyciem uczenia maszynowego. Podejście to jest nowoczesnym działaniem naukowym, które łączy w sobie potrzebę wiedzy i narzędzi pracy naukowej i inżynierskiej w tej pracy doktorskiej. Daje to wrażenie, że prezentowana praca jest interdyscyplinarna, użyteczna i łączy nowoczesne podejście naukowe do przygotowania i oceny bardzo praktycznego eksperymentu. Zakres pracy jest bardzo ważny z punktu widzenia transportu i infrastruktury. Zwiększona liczba operacji transportowych, problem starzenia się elementów konstrukcyjnych (który może prowadzić do katastrofalnych awarii), stosowanie materiałów nowej klasy, zwiększone zmiany warunków klimatycznych (podwyższone temperatury, silne burze) w nadchodzących dziesięcioleciach wymuszą stosowanie monitorowania integralności strukturalnej. Przedstawiona praca holistycznie podkreśla podejście do monitorowania konstrukcji w oparciu o kontrolę dynamiki strukturalnej. Rozwój czujników, spadek kosztów wykorzystania sprzętu, możliwość szerokopasmowej transmisji danych, stwarza możliwość gromadzenia dużych zbiorów i podzbiorów danych. Dane te powinny być nie tylko gromadzone, ale także monitorowane pod kątem czystości i korelacji danych, a także wykrywania anomalii i modelowania konstrukcji na przykładzie prezentowanych modeli zasilanych danymi rzeczywistymi (na przykładzie sieci neuronowej opartej na fizyce). Biorąc powyższe pod uwagę uważam, że **przedstawiony temat jest celowy i przydatny**, a zaprezentowana praca jest dobrze wykonana. Biorąc pod uwagę szerokie podejście do przedstawionego problemu, w tym analizę konstrukcji, modelowanie mechaniczne, przetwarzanie sygnałów, rozwój oprogramowania i wykorzystanie modeli regresyjnych wspomaganym uczeniem maszynowym, z algorytmami optymalizacyjnymi, prezentowana praca jest **interdyscyplinarna i użyteczna**.

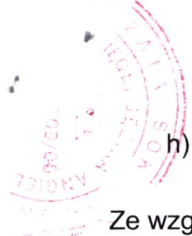
### 3. Ocena pracy doktorskiej

Przedstawiona do oceny praca obejmuje najbardziej aktualne trendy badawcze obejmujące wykorzystanie monitorowania integralności konstrukcji, metody automatycznej klasyfikacji stanu mostów kolejowych z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego oraz modelowania elementów skończonych. Przedstawiona praca sprawia wrażenie, że kandydat dobrze rozumie fenomenologię opisywanego problemu. Jednakże, w przedstawionej pracy brakuje bardziej szczegółowego opisu aktualnego stanu wiedzy w zakresie SHM dla takich konstrukcji, w tym modelowania FE i przetwarzania danych wspomaganego uczeniem maszynowym. Takie dobrze przedstawione rozpoznanie [tematu] byłoby lepszą platformą do dalszego uzasadnienia proponowanej metody ostatecznego wnioskowania o stanie konstrukcji. Przedstawiona praca zawiera również duże spektrum prezentowanych danych z modeli regresyjnych, a także optymalizacji z komentarzami osadzonymi w tekście, które utrudniają czytanie pracy. Lepszym rozwiązaniem byłoby zsumowanie najlepszych wyników i bezpośrednie porównanie np. najlepiej dobranych parametrów do optymalizacji sieci oraz zamieszczenie uzyskanych, konkretnych danych w załącznikach.

Praca zawiera wszystkie etapy, które można wymienić jako nowoczesne podejście do rozwiązywania problemów naukowych i technicznych. Jest identyfikacja problemu, jest niewielka dyskusja, jednak z dużą liczbą bibliografii prezentującej stan wiedzy naukowej, jest techniczne rozpoznanie podejścia do eksperymentu, jego planowanie i bardzo dobrze przedstawione podejście do analizy danych. Praca zawiera również dobrze przygotowaną analizę oprogramowania z kodem opracowanym w MATLAB i Pythonie do implementacji modeli i algorytmu optymalizacji, co oznacza, że autor jest dobrze zaznajomiony z aktualną praktyką programowania i projektowania algorytmów. W mojej ocenie, praca doktorska spełnia wymagania związane z wniesieniem oryginalnego wkładu w obszar poznawczy dyscypliny naukowej, którą zajmuje się doktorant. Dodatkowo pragnę podkreślić, że praca ma charakter **interdyscyplinarny i utylitarny**, oparty na wykorzystaniu nowoczesnych metod i narzędzi badawczych, w tym analizy danych, modelowania, przygotowania eksperymentów oraz analityki i optymalizacji danych, a także wykorzystania kodowania. Niewątpliwie proponowana praca, ze względu na przedstawione przypadki użycia oraz rozwiązania analityczne, ma charakter praktyczny, a jej wyniki mogą być wykorzystane w praktyce inżynierskiej. Takie rozwiązanie powinno zostać wdrożone w prezentowanej dziedzinie inżynierii lądowej.

Podstawowe zalety pracy doktorskiej w zakresie przedstawionego tematu, scharakteryzowanych problemów, podejścia do eksperymentów oraz zastosowanych metod badawczych są następujące:

- a) bardzo aktualny przedstawiony problem technologiczny związany z monitorowaniem integralności strukturalnej konstrukcji wielkoskalowych, takich jak mosty;
- b) podejście do rozwiązania problemu, w tym przygotowanie metodologii eksperymentu, analiza danych na dużą skalę i implementacja modelu;
- c) wykorzystanie danych rzeczywistych do optymalizacji modeli i wybór metod analizy takich danych;
- d) zastosowanie metodologii klastrowania do optymalizacji parametrów ANN w oparciu o rzeczywiste dane;
- e) przygotowanie metodologii aktualizacji i optymalizacji modelu w oparciu o algorytm genetyczny i optymalizację roju;
- f) wykorzystanie CNN do analizy obrazu z wykorzystaniem CWT i ekstrakcji cech kształtu orbity;
- g) weryfikacja przedstawionego podejścia dla rzeczywistego scenariusza w oparciu o dane zebrane z dwóch mostów zlokalizowanych w Wietnamie;



h) dobrze napisana praca w języku angielskim.

Ze względu na szeroki zakres testów i analiz, praca nie jest wolna od wad, do których zaliczam:

- a) brak bardziej szczegółowego omówienia uzyskanych wyników w kilku rozdziałach, takich jak:
  - ✓ oparty na strukturze wybór zmiennych wejściowych oparty na analizie lasu losowego;
  - ✓ bardziej szczegółowe wyjaśnienie poparte ograniczeniami struktury kryteriów wyboru strategii optymalizacji modelu ANN;
  - ✓ brak dyskusji na temat skuteczności metodologii różnych architektur optymalizacji ANN i ANFIS;
  - ✓ brak dyskusji na temat wyboru najlepszych parametrów do analizy opartej na wibracjach (wybór RMS).
  - ✓ brak bardziej szczegółowego omówienia z przykładowymi danymi do rekonstrukcji orbity dla analizy falkowej.
- b) brak uzasadnienia dla doboru liczby akcelerometrów na element oraz całkowitej liczby akcelerometrów do zbierania danych, na przykładzie eksperymentu przedstawionego na stronie 35;
- c) Rozdział 3 w bardzo zwięzły sposób przedstawia ocenę stosowanych rozwiązań SoA do monitorowania mostów. Lepiej skoncentrowany na problemie syntetyczny opis zalet i wad zastosowanych rozwiązań mógłby przynieść lepsze uzasadnienie dla proponowanego zakresu pracy i przedstawionych motywacji;
- d) brak uwzględnienia precyzji i przywołania w definicjach danych statystycznych - strona 26;
- e) niektóre błędy dotyczące odniesienia do literatury (jako przykład: s.33 - odniesienie do [33] nie [133]);
- f) pewne problemy edycyjne z przejrzystością opisu danych, takie jak zrozumienie danych na rys. 5.6 - rozkład danych nieliczbowych dotyczących stanu: uszkodzenia, niezdrowego lub przeciążenia.
- g) widoczność etykiet danych dla map cieplnych dla optymalizacji liczby neuronów na rys. 4.11 - 4.335 nie są one dobrze przedstawione do analizy.

Ponadto oczekuję, że autor opracowania odpowie na następujące pytania:

- Proszę o wyjaśnienie uzasadnienia wyboru RMS do analizy drgań. Dlaczego inne parametry, takie jak skośność lub kurtoza, nie zostały wybrane do grupowania danych?
- Proszę o bardziej szczegółowe wyjaśnienie kryteriów wyboru strategii optymalizacji modelu ANN przedstawionych w tabeli 4.2 - strona 42. W jaki sposób wybrano strategię optymalizacji?
- Na rys. 5.6. wartości liczbowe modelu siły rozciągającej zostały przedstawione za pomocą wykresu pudełkowego. Proszę o wyjaśnienie przyczyny rozkładu wartości skwantyfikowanych (wąsy pudełkowe) oraz zmiany zakresu rozkładu dla wszystkich dźwigarów w stanie uszkodzonym.
- Duże zbiory danych są podatne na przesunięcia lub braki. Jak radzić sobie z przesunięciem danych lub brakującymi wartościami? Czy istnieje konieczność kalibracji czujników drgań ze względu na przesunięcie sygnału i jak to monitorować (przesunięcie i brak danych) w celu ciągłego korzystania z systemu SHM?
- Rozdziały 5.2.5 i 5.2.6. przedstawiają podejście do kwalifikacji struktury dla stanu zdrowego i uszkodzonego. Proszę o bardziej szczegółowe wyjaśnienie zestawu danych treningowych, który został użyty jako dane etykietowane.

- W jaki sposób stosunkowo powolne procesy - takie jak korozja zbrojenia stalowego i starzenie się betonu - mogą wpływać na obserwowane dane. Czy konieczne jest ponowne wytrenowanie modelu?
- W jaki sposób wykorzystanie sieci neuronowych opartych na fizyce (ang. Physics Informed Neural Network, PINN) może wpłynąć na precyzję modelu i ewentualnie przynieść korzyści jego bardziej szczegółowej klasyfikacji?

#### 4. Wniosek końcowy

Przedstawiona przez Pana Nguyen[a] Cong Duc[a] praca doktorska swoją treścią i formą, pomimo opisanych powyżej mankamentów, pokazuje jego wiedzę w zakresie diagnostyki i monitorowania konstrukcji wielkogabarytowych. Sposób przedstawienia pracy świadczy o tym, że doktorant potrafi zaprojektować, przeprowadzić i prawidłowo zakończyć zaawansowaną pracę naukową z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi naukowych i inżynierskich. **Biorąc pod uwagę ocenę pracy doktorskiej uważam, że jest ona oryginalnym rozwiązaniem problemu naukowego i świadczy o ogólnej wiedzy teoretycznej doktoranta w zakresie prowadzenia pracy naukowej. Potwierdza również umiejętność prowadzenia pracy naukowej. Spełnia tym samym wymogi ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668, z późn. zm.). Wnoszę o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.**

[podpis nieczytelny]

---

Ja, Małgorzata Sokółowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi plikiem pdf sporządzonym w języku liwice, dnia 23 września 2024 r. Repertorium nr 587/2024.

Tłumacz Przysięgły  
Małgorzata Sokółowska

