

Silesian University of Technology
Faculty of Civil Engineering
Department of Mechanics and Bridges

DOCTORAL DISSERTATION

*Bridge health monitoring using automated FE model
updating, signal processing, and machine learning*

NGUYEN CONG DUC

Dissertation supervisor: Marek Salamak
Full Professor, Ph.D., D.Sc. Eng.
Silesian University of Technology, Gliwice
Faculty of Civil Engineering
Department of Mechanics and Bridges

Dissertation supervisor: Andrzej Katunin
Associate Professor, Ph.D., D.Sc. Eng.
Silesian University of Technology, Gliwice
Faculty of Mechanical Engineering
Department of Fundamentals of Machinery Design

Gliwice, May 2024

Bridge health monitoring using automated FE model updating, signal processing, and machine learning

Doktorant: Nguyen Cong Duc

Rozszerzone streszczenie w języku polskim

1. Motywacje i cele

1.1. Motywacje do podjęcia badań

Motywacje do podjęcia się w badań w zakresie monitorowania stanu technicznego konstrukcji (ang. Structural health monitoring – SHM) mostów związane są z następującymi pytaniami badawczymi:

- Czemu powinien służyć system SHM w przypadku obiektów mostowych i czy do jego poprawnego funkcjonowania konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych badań pod próbnym obciążeniem?
- Na rynku dostępnych jest wiele różnie skonfigurowanych systemów SHM, które funkcjonują w urządzeniach mechanicznych, zatem jakie rozwiązania sprawdzają się w przypadku obiektów mostowych?
- Obiekt mostowy składa się z wielu różnych elementów konstrukcyjnych, których odpowiedź na wymuszenia może być obserwowana przy pomocy różnych rodzajów czujników. Jakie metody i techniki będą najlepiej służyć określeniu parametrów mechanicznych konstrukcji?
- Jak skrócić czas i koszty monitoringu przy zachowaniu wysokiego poziomu wykrywalności ewentualnych zdarzeń?
- Jakie są najlepsze technologie i algorytmy do przetwarzania i zarządzania danymi rejestrowanymi na prawdziwym obiekcie mostowym w terenie? Jak efektywnie pozyskiwać i przetwarzać dane?

1.2. Cel i zakres pracy

Przeprowadzone rozeznanie stanu wiedzy i próba odpowiedzi na powyższe pytania pozwoliły sformułować cele badań. Celem pracy jest zaproponowanie metod zautomatyzowanej aktualizacji modelu MES oraz przetwarzania sygnałów z użyciem techniki uczenia maszynowego, które można wykorzystać do monitorowania stanu technicznego mostu. Zakres obejmuje zagadnienia związane z automatyczną kalibracją modelu mostu MES na podstawie testów terenowych, zaawansowane przetwarzania sygnałów rejestrowanych drgań zebranych podczas długoterminowego monitorowania stalowego mostu kolejowego o konstrukcji łukowej. Zostały one wzbogacone technikami uczenia maszynowego do przewidywania stanu technicznego mostu. Oprócz tego przewidziano również diagnostyczny test polegający na próbnym obciążeniu mostu. Jego celem jest wykorzystanie danych terenowych do kalibracji modelu MES w zakresie oceny nośności konstrukcji. Proponuje się, aby ostateczny skalibrowany model MES został zintegrowany z systemem SHM istniejącego mostu.

Instalowane na obiektach mostowych systemy SHM służą do śledzenia zmian w czasie w zależności od różnych zdarzeń z obciążeniem i warunkami pogodowymi. W przypadku mostów kolejowych mają one za zadanie rejestrować dynamiczne zachowanie elementów konstrukcji (w danym przypadku wieszaków i przęseł) pod wpływem wymuszeń pochodzących od taboru kolejowego. Pomiar drgań wykorzystany może być do eksperymentalnej analizy częstotliwości drgań własnych wieszaków, a następnie do określenia sił rozciągających i naprężeń. W ramach zwiększenia funkcjonalności takich systemów proponowane są odpowiednie poziomy alarmów.

Sygnały mierzone podczas badań terenowych to odkształcenia, ugięcia i częstotliwości własne rzeczywistego mostu. Te zmierzone sygnały można wykorzystać do aktualizacji modelu MES w celu kalibracji właściwości materiałowych i sztywności przęseł. Właściwą metodą do testowania i monitorowania konstrukcji mostów jest innowacyjne rozwiązanie, które umożliwia połączenie pozyskanych sygnałów z aktualnymi specyfikacjami i normami dotyczącymi projektowania mostów.

Czas trwania oraz koszty testowania i monitorowania mostów bardziej uzależnione od przetwarzania danych i zarządzania nimi, niż od użycia wielu czujników na obiekcie w terenie. Czujniki można ponownie wykorzystać w różnych konstrukcjach mostów, natomiast potrzeby i wymagania dotyczące przetwarzania danych mogą się różnić w zależności od odpowiedzi każdego mostu pod obciążeniem dynamicznym.

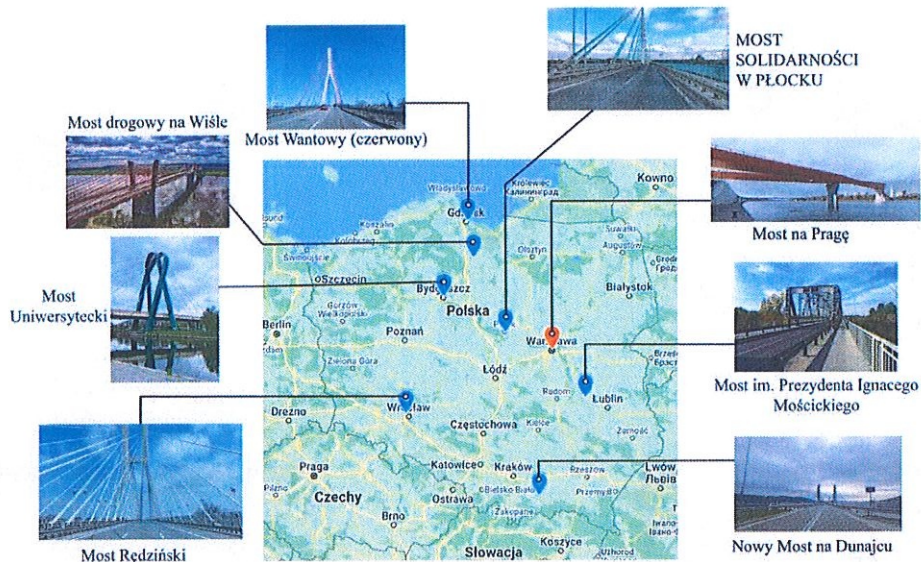
Metody przetwarzania danych obejmują algorytmy szybkiej transformacji Fouriera (ang. Fast Fourier transform – FFT), transformacje falkowe i uczenie maszynowe, w tym uczenie głębokie. Zastosowano zaawansowane techniki przetwarzania sygnałów z drgań zarejestrowanych systemem SHM w celu analizy wzorców danych terenowych, a także przewidywania zachowania konstrukcji podczas działania na nią różnych rodzajów obciążeń.

Najważniejsze osiągnięcia pracy można podsumować w następujący sposób:

- Zaproponowano zautomatyzowaną kalibrację modelu MES 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 i mają na celu wykazanie możliwości zastosowania i skuteczności proponowanych algorytmów aktualizacji modelu MES.
- Opracowano modele regresji wspomagane uczeniem maszynowym, które pozwalają przewidywać dynamiczne zachowanie się przęśla mostu kolejowego w odniesieniu do różnych zdarzeń kolejowych. Zbiory danych wykorzystane w modelach predykcyjnych zostały zebrane dzięki systemowi SHM, który zamontowany był na kolejowym stalowym moście łukowym w Dębicy w okresie dziewięciu miesięcy od grudnia 2019 r. do września 2020 r.
- Opracowano modele klasyfikacji GoogLeNet CNN w celu przewidywania stanu technicznego wieszaków istniejącego mostu kolejowego przy użyciu postaci orbit otrzymywanych dla dwóch kierunków, dla których były pozyskiwane sygnały drganiowe oraz skalogramów dla tych sygnałów uzyskiwanych przy zastosowaniu ciągłej transformacji falkowej.

2. Stan obecny i kierunki rozwoju systemów monitorowania stanu technicznego mostów

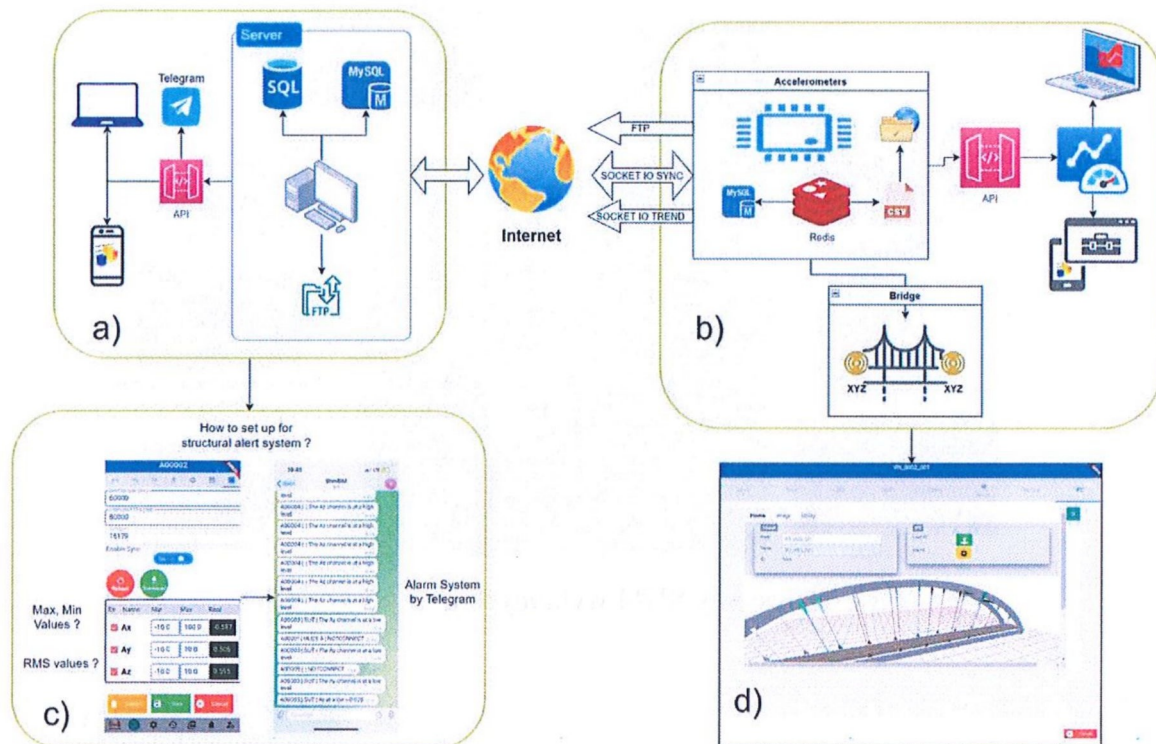
W tym rozdziale przedstawiono przegląd aktualnego stanu i trendów rozwojowych najnowocześniejszych systemów monitorowania stanu technicznego mostów. Zarówno w Polsce jak i w Wietnamie, gdzie infrastruktura cywilna szybko się rozwinęła, należy spodziewać się znacznego wzrostu wymagań i potrzeb rynku systemów SHM. Kompleksowe rozwiązania inteligentnego przetwarzania danych i zarządzania systemami SHM opartymi na danych mają na celu wdrożenie technik uczenia maszynowego zaprojektowanych z wykorzystaniem inteligentnego systemu ostrzegania w czasie rzeczywistym. Pozwala to zapewnić bezpieczeństwo, niezawodność i integralność konstrukcji mostowych podczas dużych obciążeń, występowania zagrożeń naturalnych i ryzyka zmiany pogody. Zarządzanie danymi rejestrowanymi przez system SHM to nie tylko inteligentne przetwarzanie danych, ale także zarządzanie informacją o obiekcie mostowym w postaci tzw. cyfrowych bliźniaków (ang. digital twins). Co więcej, krajowe wytyczne i przepisy dotyczące monitorowania obiektów budowlanych, w tym mostów, należy stale aktualizować, aby spełniały międzynarodowe standardy, kodeksy i specyfikacje.



Rys. 1. Systemy SHM wybranych mostów w Polsce.



Rys. 2. Systemy SHM wybranych mostów w Wietnamie.



Rys. 3. Inteligentne zarządzanie danymi SHM w oparciu o cyfrowe bliźniaki: a) Integracja algorytmów uczenia maszynowego dla systemu SHM; b) System SHM oparty na pomiarach drgań; c) Inteligentny system ostrzegania wykorzystujący aplikację Telegram; d) Zarządzanie danymi BrIM.

3. Przyrządy do gromadzenia danych i zaawansowane przetwarzanie sygnałów

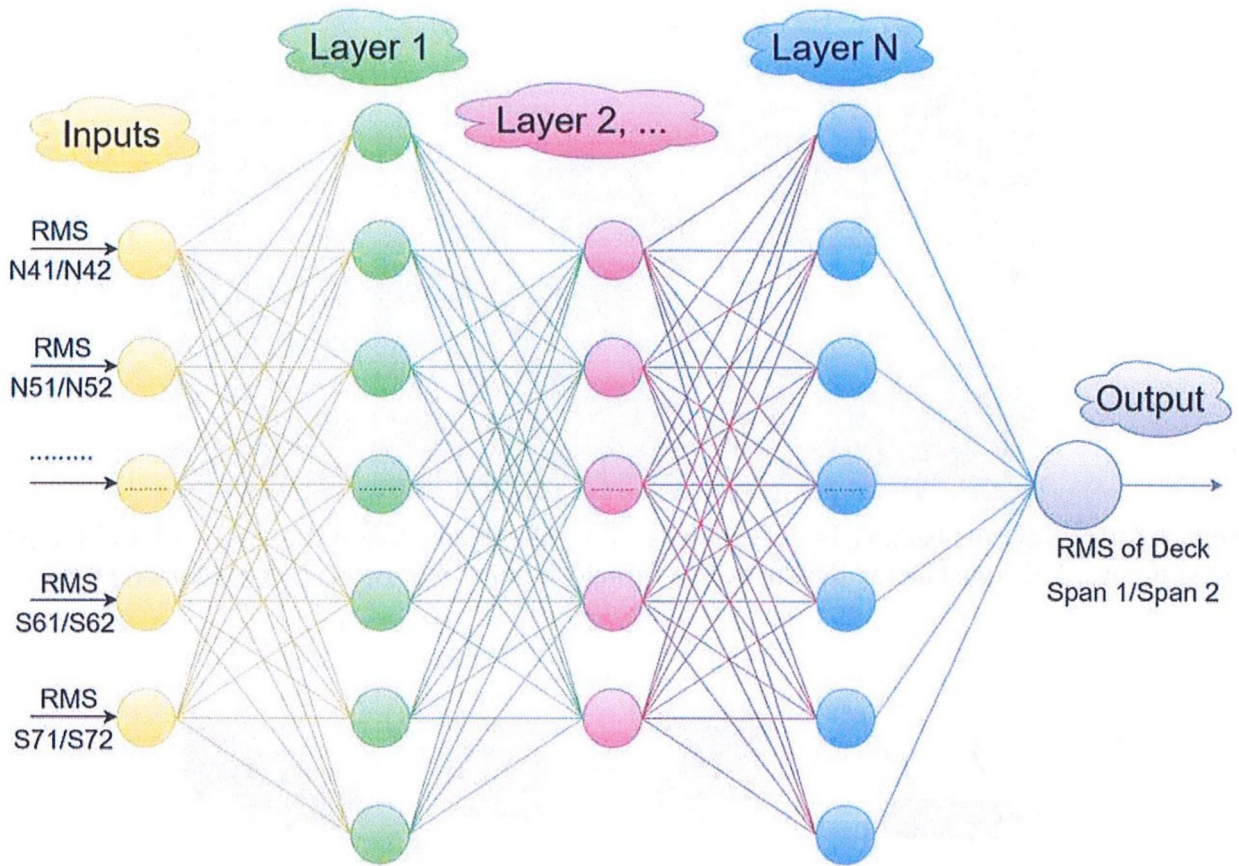
W tym rozdziale przedstawiono aparaturę wykorzystywaną do terenowych badań mostów pod próbnym obciążeniem oraz w długoterminowych systemach SHM bazujących na rejestrowaniu drgań. Przedstawiono diagnostyczne badania obciążeniowe stosowane na mostach w Polsce i Wietnamie. Zaawansowane metody przetwarzania sygnałów są wykonywane przy użyciu transformacji falkowych z wykorzystaniem falek Morse'a, Morleta i Bumpa. Celem jest konwersja sygnałów z drgań na obrazy w postaci dwuwymiarowych skalogramów, które są traktowane jako dane wejściowe dla modeli klasyfikacji sieci neuronowych typu CNN. Takie sieci mogą być dalej wykorzystane do przewidywania potencjalnych defektów i uszkodzeń konstrukcyjnych mostu. Architektura GoogLeNet służy do klasyfikacji map cech w celu rozpoznawania analizowanych i zebranych obrazów pozyskanych z sygnałów drgań w drodze przetwarzania. Ponadto proponuje się również zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (ang. Artificial neural network – ANN), technikę ANFIS oraz technikę losowego lasu decyzyjnego w celu wyodrębnienia funkcji danych terenowych, a także opracowanie modeli regresji w celu przewidywania stanu technicznego mostu. Zmiennymi wejściowymi zoptymalizowanych modeli opartych na ANN i technice ANFIS są wartości RMS sygnałów drganiowych zainstalowanych na wieszakach, a danymi wyjściowymi – wartości RMS odpowiedzi dynamicznych na każdym z dwóch przęseł mostu. Dodatkowo wprowadzono metryki oceny dla modeli klasyfikacji i regresji. Do oceny dokładności modeli regresji wykorzystuje się metryki R^2 , RMSE, MAE, MAPE i NSE. Wskaźniki F1-score, makro F1-score i ważone wskaźniki F1-score służą do oceny wydajności modeli klasyfikacji odnoszących się do nieźrównoważonych zbiorów danych.



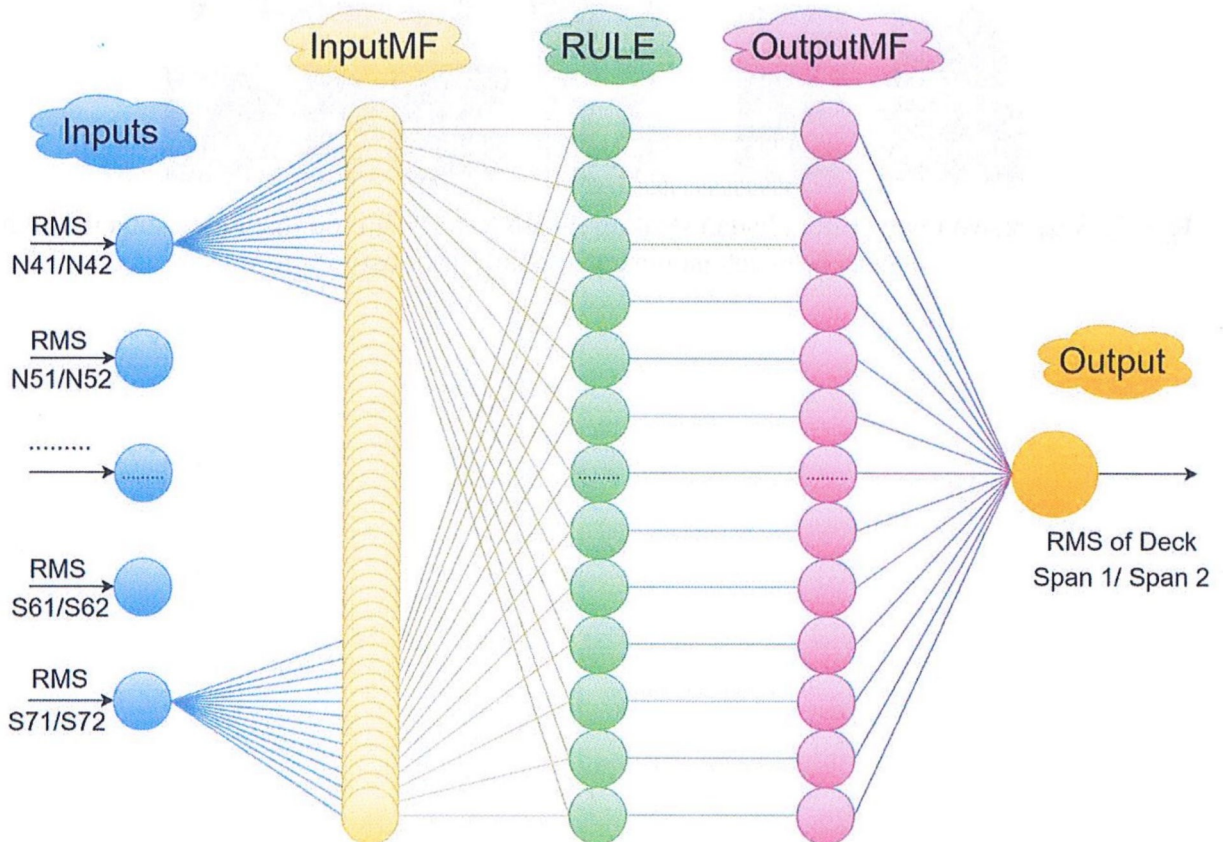
Rys. 4. Diagnostyczne badania obciążeniowe stalowych mostów łukowych: a), b), c), d) Stalowy most łukowy **kolei wiślanej** w Krakowie; e), f) Stalowy most łukowy na rzece Kędzierzyn-Koźle (DK40).



Rys. 5. Bezprzewodowy system badań strukturalnych (STS-WiFi) do diagnostycznych badań obciążeniowych istniejących obiektów mostowych.



Rys. 6. Architektura ANN ze zmiennymi wejściowymi i wyjściowymi RMS.

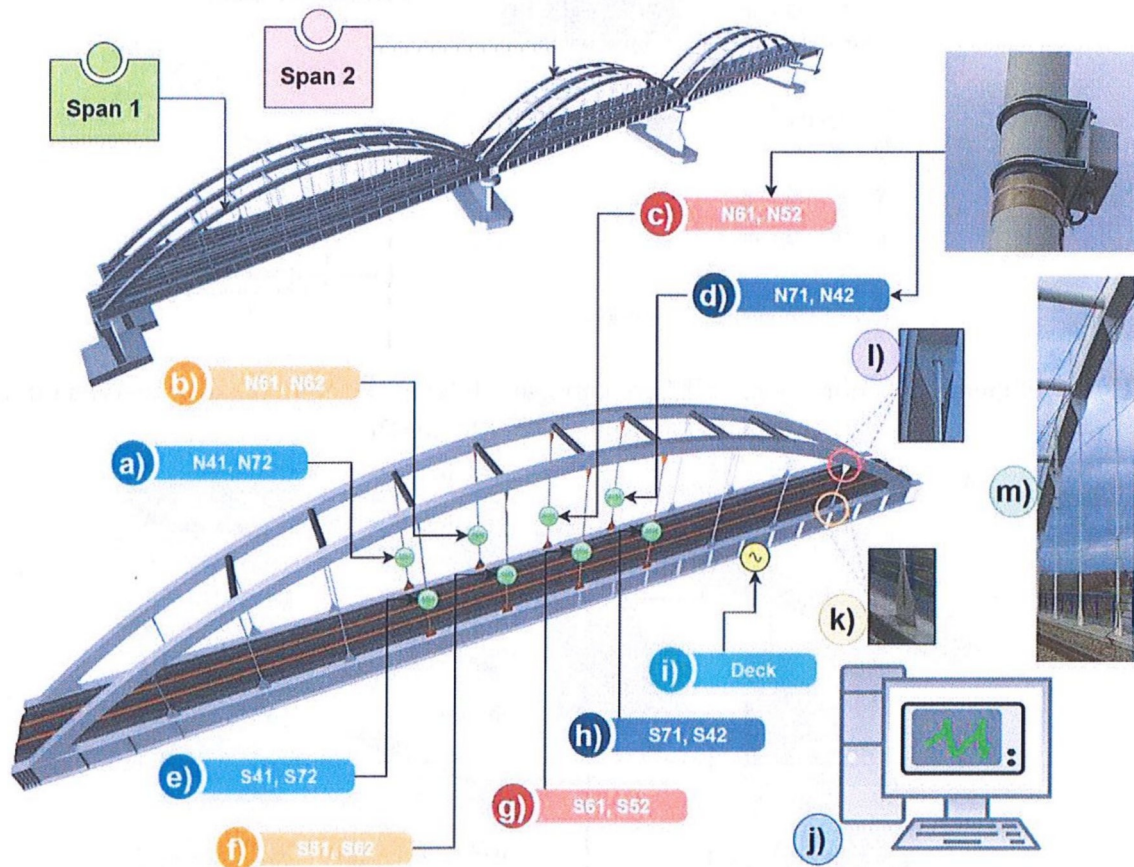


Rys. 7. Architektura modelu ANFIS.

4. Monitoring stanu mostu kolejowego z wykorzystaniem uczenia maszynowego

W tym rozdziale przedstawiono system SHM bazujący na pomiarze drgań kolejowego mostu łukowego ze zoptymalizowanymi modelami regresji w oparciu o ANN i technikę ANFIS, które podsumowano w następujący sposób:

- Opracowanie modeli wspomaganych ANN i ANFIS do przewidywania przyszłych wartości RMS mostu w oparciu o historyczne zbiory danych wartości RMS reakcji drgań wieszaka.
- Wdrożenie podejść optymalizacyjnych opartych na algorytmie genetycznym w celu dostosowania parametrów, w tym liczby ukrytych neuronów w każdej ukrytej warstwie architektury SSN dla różnych proponowanych strategii predykcji.
- Porównanie zoptymalizowanych modeli regresji ANN zintegrowanych z algorytmem genetycznym i z modelami ANFIS z wykorzystaniem różnych wskaźników wydajności w celu wiarygodnej i skutecznej oceny modeli predykcyjnych opartych na uczeniu maszynowym.
- Wykorzystanie analizy współczynników korelacji i ocen istotności opartych na metodzie losowego lasu decyzyjnego, mające na celu zrozumienie ogólnego związku między indywidualnymi cechami wejściowymi a zmiennymi wyjściowymi w modelach regresji predykcyjnej, co zapewnia cenne spostrzeżenia i pomaga w zmniejszeniu liczby zmiennych wejściowych.
- Omówienie zalet i ograniczeń w podejściach wspomaganych uczeniem maszynowym (ANN i ANFIS) dla systemu SHM opartego na drganiach złożonej konstrukcji stalowego mostu łukowego w Polsce.



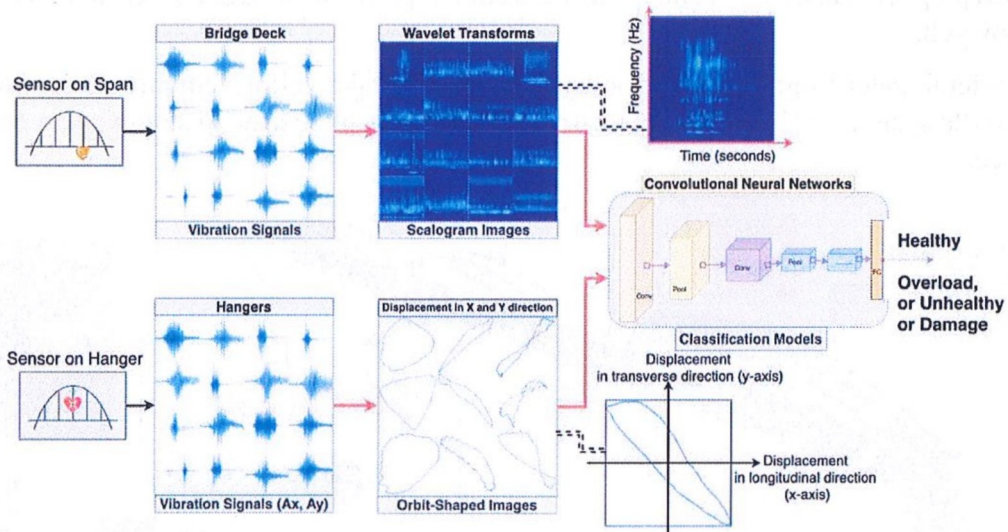
Rys. 8. Wibracyjny system SHM kolejowego mostu łukowego w Dębicy: a), b), c), d), e), f), g), h) akcelerometry wieszaków; i) akcelerometr piezoelektryczny pokładu; j) system akwizycji danych; k) połączenie spawane wieszaka z belką dwuteową; l) połączenie spawane wieszaka z żebrzem łukowym; m) wieszaki.

5. Diagnostyka stanu technicznego mostu kolejowego z wykorzystaniem analizy falkowej i głębokiego uczenia maszynowego

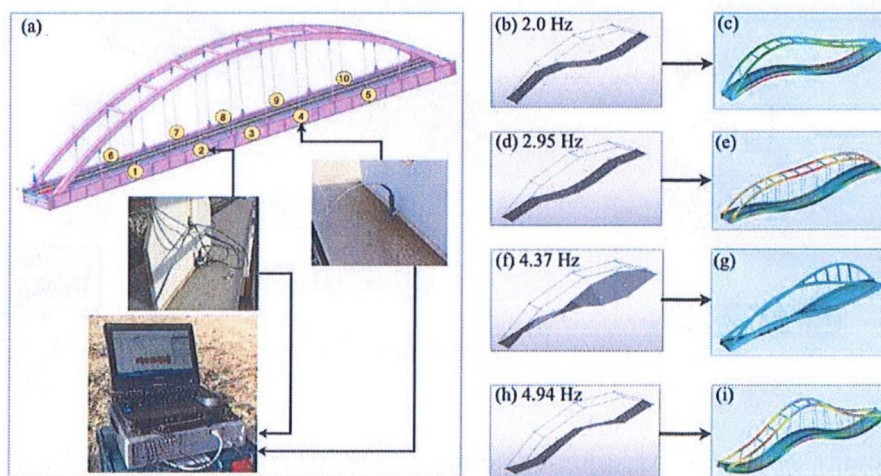
W tym rozdziale zaproponowano metody głębokiego uczenia maszynowego dla SHM opartego na danych dla łukowego mostu kolejowego w Dębicy. Na rys. 9 pokazano modele GoogLeNet CNN do klasyfikacji stanu wieżaków na podstawie przypadków obciążenia pociągiem i zmian pogody w okresie dziewięciu miesięcy działania systemu.

Po pierwsze, skalogramy sygnałów drgań uzyskanych z wykorzystaniem ciągłej transformacji falkowej służą jako obraz wejściowy modeli CNN, natomiast wyjściem są stany wieżaków oparte na naprężeniach uzyskanych z eksperymentalnie określonych częstotliwości drgań własnych wieżaków. Kalibracja modelu MES kolejowego mostu łukowego opracowano w celu odtworzenia wartości siły rozciągającej wieżaków przy użyciu standardów projektowania mostów.

Po drugie, opracowano modele CNN oparte na orbitach sygnałów drganiowych dla każdego wieżaka w kierunku wzdłużnym i poprzecznym. Techniki przetwarzania sygnałów drgań wieżaka w dyskretnej dziedzinie częstotliwości oparte na FFT są stosowane w celu przekształcenia pozyskanych sygnałów z dwuosioowych akcelerometrów każdego wieżaka na obrazy w kształcie orbity oparte na przemieszczeniu.

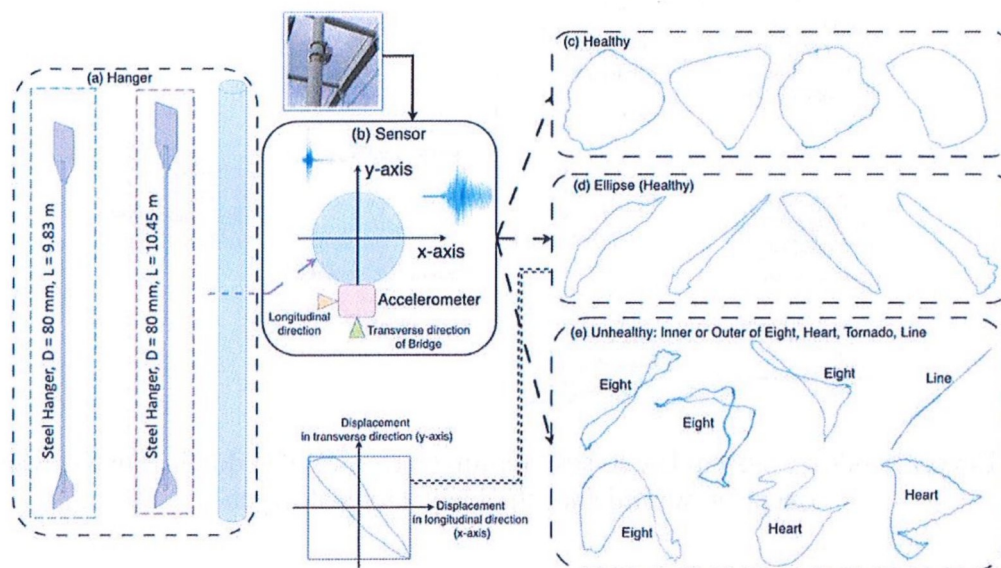


Rys. 9. Diagnostyka obrazowa SHM wspomagana falkami i CNN oraz diagnostyka obrazu oparta na orbitach wibracyjnych.



Rys. 10. Wibracyjne badania diagnostyczne przęsła mostu 1: a) pomiar drgań pola za pomocą akcelerometrów jednoosiowych (PCB Piezotronics) zainstalowanych w 10 miejscach wzdłuż

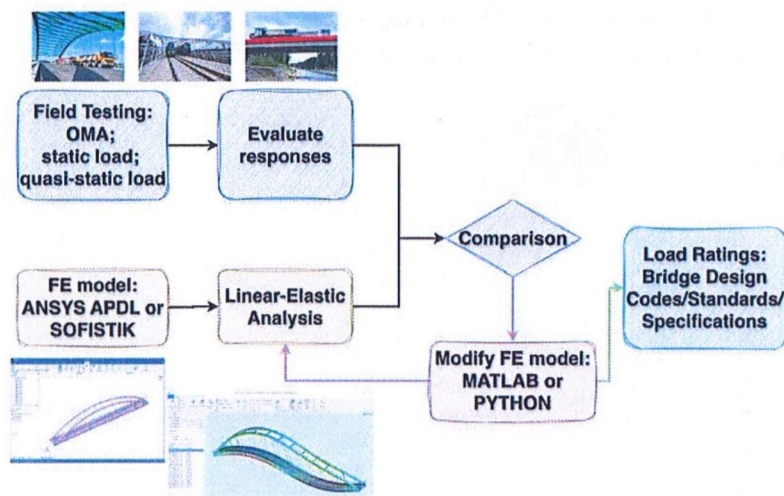
dwóch dźwigarów głównych; b), d), f), h) eksploatacyjna analiza modalna z wykorzystaniem oprogramowania Siemens LMS TestLab; c), e), g), i) Aktualizacja modelu MES.



Rys. 11. Różne kształty orbit typów zdrowych stanów wieszaków: a) wieszaki; b) akcelerometry lub czujniki wibracyjne; c) d) poprawne; e) niepoprawne.

6. Diagnostyczne parametry obciążenia mostu przy użyciu automatycznej aktualizacji modelu MES

Rozdział ten dotyczy aktualizacji modelu MES z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych w postaci roju cząstek (ang. Particle Swarm Optimization – PSO) i algorytmu genetycznego (ang. Genetic algorithm – GA), tak aby ostatecznie skalibrowane modele MES można było wykorzystać do diagnostycznych badań obciążeniowych istniejących konstrukcji mostowych. Skrypty i funkcje w MATLAB zawierają algorytmy optymalizacyjne, które łączą się ze skrypcem języka CADINP z modelowaniem MES konstrukcji mostu zaimplementowanym w SOFISTIK TEDDY w celu automatycznej aktualizacji zmiennych sztywności dla przekroju poprzecznego elementów konstrukcyjnych. Aktualizacja pełnoskalowego modelu MES istniejącego mostu poprzez częstotliwości własne zmierzone w terenie jest porównywana i modyfikowana z numerycznymi częstotliwościami własnymi analitycznego modelu MES zaimplementowanego w oprogramowaniu MATLAB do komunikacji z oprogramowaniem ANSYS APDL. Głównym celem tworzenia skalibrowanych modeli w pełnej skali jest posiadanie jednego realistycznego modelu do oceny nośności i przewidywania ewentualnych ograniczeń nośności przy użyciu określonych specyfikacji, które można wykonać dla dowolnej konfiguracji obciążenia. Ostateczne modele skalibrowane w terenie można wykorzystać do oceny nośności elementów konstrukcyjnych zgodnie ze standardami projektowymi.



Rys. 12. Bezprzewodowy system badań strukturalnych (STS-WiFi) do diagnostycznego badania obciążeń w istniejących obiektach mostowych.

7. Wnioski

Celem niniejszej pracy było zbadanie zautomatyzowanej metody aktualizacji modelu MES konstrukcji mostu z użyciem zaawansowanego przetwarzania sygnałów i uczenia maszynowego w celu monitorowania stanu technicznego mostu. Przeanalizowano zestawy danych terenowych zebrane podczas testów diagnostycznych obciążenia mostu i monitorowania mostu kolejowego poprzez kalibrację modelu MES, a także ocenę stanu technicznego konstrukcji wspomaganą uczeniem maszynowym. Z uzyskanych wyników wyciągnięto następujące wnioski:

- Aktualizacja modelu MES odgrywa kluczową rolę w odtwarzaniu danych numerycznych podczas porównywania zmierzonych i obliczonych odpowiedzi konstrukcji, wykorzystywanych do określenia nośności granicznej lub dopuszczalnych obciążeń oraz przeciążenia istniejących mostów. Ostateczny skalibrowany model MES można wykorzystać do określenia dopuszczalnej nośności elementów konstrukcyjnych na potrzeby inteligentnego systemu alarmowego służącego do długoterminowego monitorowania stanu technicznego mostu.
- Opracowano aplikacje zintegrowane z techniką głębokiego uczenia maszynowego dla systemu SHM opartego na pomiarze drgań kolejowego stalowego mostu łukowego. W celu przewidywania stanu technicznego wieszaków na moście kolejowym w Dębicy w Polsce wykonano modele klasyfikacyjne CNN wspomagane transformacją falkową. Wartości siły rozciągającej wieszaków obliczono na podstawie eksperymentalnych odpowiedzi na drgania i zaktualizowanego modelu MES w celu oznaczenia stanu prawidłowego i przeciążenia każdego wieszaka w modelach klasyfikacji CNN. Wykorzystując nauczone modele CNN można przewidzieć stan wieszaków pod wpływem różnych efektów obciążenia dynamicznego na podstawie pomiarów z pojedynczego akcelerometru zainstalowanego na przęśle mostu.
- Przeprowadzono monitorowanie stanu wieszaków w oparciu o głębokie uczenie maszynowe, wykorzystując analizę kształtu orbity dwukierunkowego czujnika drgań, aby ocenić zachowanie wieszaków przy zginaniu i skręcaniu pod wpływem obciążenia pociągiem i wzbudzenia wiatrem. Zastosowanie orbit do monitorowania stanu wieszaków mogłoby uwzględniać podstawową teorię mechaniki i analizę drgań pod kątem podobieństwa zachowania mechanicznego wieszaków i wałów maszyn poddanych obciążeniom dynamicznym z uwzględnieniem ich warunków brzegowych.
- Przeprowadzono monitorowanie stanu mostu oparte na danych przy użyciu algorytmów ANN i ANFIS w celu przewidywania wartości RMS istniejącego mostu w Dębicy przy różnych zdarzeniach kolejowych w okresie dziewięciu miesięcy od grudnia 2019 r. do września 2020 r.

Nauczone modele ANN i ANFIS można wdrożyć jako elementy sztucznej inteligencji do przewidywania potencjalnych problemów strukturalnych w konstrukcjach mostowych.

Podsumowując, kalibracja modelu MES oparta na diagnostycznych testach obciążenia mostu została skutecznie sprawdzona i zastosowana w systemie SHM. Zademonstrowano aplikację takiego systemu SHM wspomaganą uczeniem maszynowym dla istniejącego mostu kolejowego poprzez integrację zaktualizowanego modelu MES w celu zapewnienia powtarzalności całego procesu. Wykorzystując system SHM zamontowany na istniejącym moście kolejowym, zaproponowano autorskie algorytmy uczenia maszynowego służące analizie sygnałów drganiowych badanej konstrukcji. Proponowane innowacyjne rozwiązania obejmowały najnowocześniejsze technologie, jakie obecnie można było wdrożyć w postaci algorytmów uczenia maszynowego w czujnikach drgań opartych na sztucznej inteligencji na potrzeby inteligentnego systemu ostrzegania i inteligentnego zarządzania danymi.

16.05.2024 r.