

Autoreferat przedstawiający opis osiągnięcia naukowego habilitanta

dr inż. Piotr Nazarko

Katedra Mechaniki Konstrukcji
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury
Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

Rzeszów, dnia 16 kwietnia 2019 r.

Spis treści

1. Syntetyczny opis sylwetki habilitanta	3
1.1. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe	3
1.2. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych .	3
1.3. Główne zainteresowania naukowe	3
1.4. Wskazanie osiągnięcia naukowego	4
2. Charakterystyka osiągnięcia naukowego	5
2.1. Wprowadzenie	5
2.2. Przykłady zastosowań sieci neuronowych	7
2.3. Najważniejsze wyniki i wnioski	8
2.3.1. Klasyfikacja i identyfikacja zmian	8
2.3.2. Porównanie technik pomiarowych	9
2.3.3. Sygnały o obniżonej jakości	10
2.3.4. Identyfikacja sił osiowych	10
2.3.5. Identyfikacja parametrów materiałowych	11
2.4. Wnioski z przeprowadzonych badań	11
2.5. Oryginalne elementy pracy	12
2.6. Zastosowania praktyczne	13
2.7. Kierunki dalszych badań	14
3. Inne zagadnienia naukowo-badawcze	16
3.1. Wykrywanie uszkodzeń w podporach ścian osłonowych	16
3.2. Badania i analiza drgań narzędzi w procesach obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym	16
3.3. Zastosowanie sieci neuronowych do kalibracji modeli mikrosymulacyjnych	17

1.

Syntetyczny opis sylwetki habilitanta

1.1. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

Doktor inżynier – Studia doktoranckie (2001–2005) na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej zakończone obroną pracy doktorskiej pt. *Ocena stanu konstrukcji i wykrywanie uszkodzeń w jej elementach* w dyscyplinie *mechanika* (dynamika konstrukcji), 2009.

Magister inżynier – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, kierunek budownictwo, specjalność *konstrukcje budowlane i inżynierskie*, specjalizacja *komputerowe wspomaganie projektowania i teoria konstrukcji*, 2001.

1.2. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

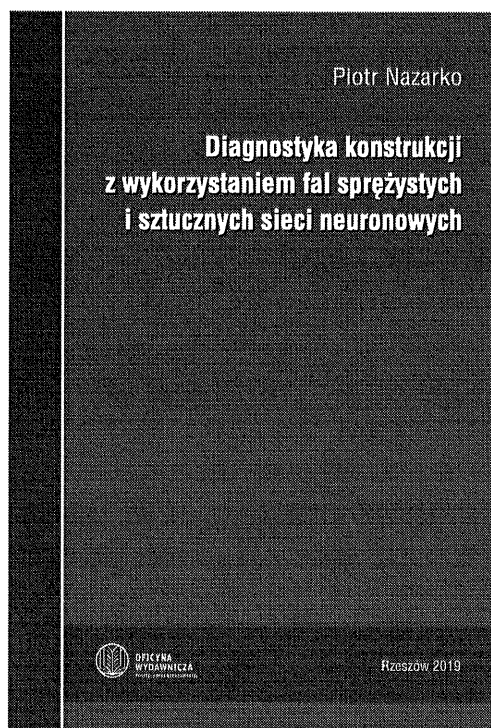
- od 2009 – **adiunkt**, Katedra Mechaniki Konstrukcji, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, Politechnika Rzeszowska.
- 2007–2009 – **asystent naukowy**, Katedra Mechaniki Konstrukcji, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska.
- 2005–2006 – **asystent naukowy**, Katedra Konstrukcji Stalowych, Uniwersytet Arystotelesa w Salonikach, Grecja.
- 2001–2005 – **instruktor**, Katedra Mechaniki Konstrukcji, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska.

1.3. Główne zainteresowania naukowe

Główne obszary moich zainteresowań naukowych stanowią: nieniszczące techniki wykrywania i oceny uszkodzeń (NDT), zastosowania miękkich metod obliczeniowych (sieci neuronowe, algorytmy genetyczne) w zadaniach klasyfikacji i identyfikacji, monitorowanie stanu konstrukcji (SHM), zastosowania zjawiska propagacji fal sprężystych, mechanika i dynamika konstrukcji, metoda elementów skończonych (MES), przetwarzanie danych pomiarowych, pomiary bezkontaktowe za pomocą wibrometrów laserowych (LDV), laserowy skaning 3D.

1.4. Wskazanie osiągnięcia naukowego

Moje osiągnięcie naukowe stanowi dzieło opublikowane w całości jako monografia habilitacyjna pt. *Diagnostyka konstrukcji z wykorzystaniem fal sprężystych i sztucznych sieci neuronowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2019.



W monografii omówione zostały wybrane przykłady zastosowania zjawiska propagacji fal sprężystych oraz sztucznych sieci neuronowych w zadaniach diagnostyki konstrukcji i jej elementów. Zaproponowany algorytm pozwala na dwuetapową identyfikację, polegającą na klasyfikacji wzorców oraz na predykcji parametrów wykrytych anomalii. Jego działanie zweryfikowano w odniesieniu do elementów o różnych kształtach (pasma, arkusz, układy prętowe, śruba) i wykonanych z różnych materiałów (stal, aluminium, kompozyt GFRP i CFRP). Uzyskane wyniki pozwoliły na porównanie różnych algorytmów wnioskowania (ANN, SVM, SNN) oraz wpływu zastosowanych technik pomiarowych (kontaktowe i bezkontaktowe) na czułość i dokładność diagnostyki.

Oprócz przykładów badań ukierunkowanymi głównie na wykrywanie i identyfikację uszkodzeń monografia zawiera dwa przykłady zastosowania sztucznych sieci neuronowych i fal sprężystych, które dotyczą predykcji sił osiowych oraz identyfikacji parametrów materiałowych.

Omówione wyniki zadań klasyfikacji wzorców i predykcji identyfikowanych parametrów, poparte licznymi przykładami badań doświadczalnych, wnoszą istotny wkład w popularyzację miękkich metod obliczeniowych i wskazanie praktycznych ich zastosowań w obszarze nieniszczących technik badań konstrukcji (NDT) oraz systemów monitorowania ich stanu (SHM). Dużą zaletę przedstawionej idei stanowi możliwość automatyzacji procesów związanych z rejestracją, przetwarzaniem sygnałów i wnioskowaniem, co przyspiesza diagnostykę, zwiększa dostępność inspekcji i pozwala na implementację w systemach ciągłego monitorowania.

Opis najistotniejszych jej elementów oraz wynikających z niej wniosków przedstawiono w rozdziale 2.

2.

Charakterystyka osiągnięcia naukowego

2.1. Wprowadzenie

Interdyscyplinarny charakter metod i narzędzi diagnostyki konstrukcji (NDT/SHM) sprawia, że jest ona chętnie podejmowana przez badaczy z różnych obszarów nauki. Obejmują one zagadnienia związane m.in. z symulacjami numerycznymi, mechaniką, badaniami doświadczalnymi, mechatroniką, automatyką, metrologią, przesyłaniem, przetwarzaniem i analizą danych pomiarowych, elektroniką i informatyką. Opracowana monografia ma na celu usystematyzowanie stanu wiedzy w zakresie konkretnej metodyki badań (zjawisko fal sprężystych) i narzędzi wnioskowania (sieci neuronowe). Pokazuje ona także znaczny potencjał systemów diagnostycznych przez omówione praktyczne przykłady możliwych ich zastosowań.

Pierwszy rozdział monografii zawiera wprowadzenie w tematykę badań nieniszczących opierających się na zjawisku propagacji fal sprężystych oraz wnioskowaniu wykorzystującym sztuczne sieci neuronowe.

W rozdziale drugim przedstawiono ideę działania systemu diagnostycznego, który może być wykorzystany do monitorowania stanu różnych konstrukcji i jej elementów. W pracach naukowo-badawczych prowadzonych po doktoracie autor przeanalizował możliwość zastosowania rozwijanego systemu w odniesieniu do próbek materiałów kompozytowych (GFRP/CFRP) oraz modelu laboratoryjnego ramy stalowej. Przedstawił także koncepcję wykorzystania omawianej idei w badaniach elementów powierzchniowych, co zostało zweryfikowane na przykładzie danych doświadczalnych.

Rozdział drugi zawiera także opis zjawiska propagacji fal sprężystych, wykorzystanych technik pomiarowych oraz metod przetwarzania zarejestrowanych sygnałów. Wśród metod i algorytmów wnioskowania znalazły się standardowe sieci neuronowe (SNN), sieci autoasocjacyjne (ANN) oraz maszyny wektorów wspierających (SVM). Omówiona została także idea binarnych drzew decyzyjnych (DT).

Zebrane w monografii przykłady wykorzystania zjawiska propagacji fal sprężystych w połączeniu z metodami wnioskowania bazującymi na miękkich metodach obliczeniowych podzielić można na cztery grupy zagadnień:

- wykrywanie i klasyfikacja typu pojawiających się zmian (np. nieciągłości, uszkodzenia, usterki),
- predykcja parametrów wykrytych zmian (ich wielkości lub położenia),
- identyfikacja wielkości sił wewnętrznych,
- identyfikacja parametrów materiałowych.

W ramach pierwszych dwóch zagadnień omówiono wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na próbkach wykonanych z różnych materiałów (aluminium, stal, kompozyty GFRP i CFRP) i z różnymi typami nieciągłości (nacięcia i otwory symulujące uszkodzenie, uszkodzenia pochodzące od uderzenia, wysokiej temperatury i czynników chemicznych). W grupie tej znajdują się także wyniki badań przeprowadzonych na modelu ramy stalowej, w której wykrywano zmiany polegające na obluzowaniu wybranego rzędu śrub w połączeniu słupa z rygłem (rozdział 3.). Kontynuację tych zagadnień stanowi omówienie badań związanych z wpływem:

- różnych technik i narzędzi pomiarowych na dokładność wnioskowania (rozdział 4.),
- pogarszania jakości sygnału przez decymowanie, zmianę podstawy czasu, zaszumianie i okienkowanie (rozdział 5.).

Trzecie z omawianych zagadnień jest wynikiem podjętej próby identyfikacji sił w pręcie ściskanym oraz w śrubach rozciąganych połączeń kołnierзовych (rozdział 6.). Zagadnienie to jest ważne z punktu widzenia zapewnienia bezpieczeństwa i integralności konstrukcji. Identyfikacja sił w trakcie użytkowania obiektów budowlanych pozwala także na lepsze zrozumienie ich zachowania oraz planowanie ewentualnych przeglądów i remontów.

W zadaniu polegającym na identyfikacji siły ściskającej, wykorzystane zostało stanowisko dydaktyczne służące do analizy wyboczenia prętów. Przeprowadzono na nim kilka serii pomiarów w zakresie obciążenia od 50 do 2000 N. Zarejestrowane w tym czasie przebiegi fal sprężystych posłużyły do stworzenia bazy wzorców oraz podjęcia próby identyfikacji wielkości siły osiowej.

Drugie z zadań dotyczących identyfikacji sił osiowych wykorzystuje wyniki badań połączeń kołnierзовych poddanych próbie statycznego rozciągania w maszynie wytrzymałościowej. Cztery z sześciu śrub wyposażono w czujniki sił w formie podkładek. Jednocześnie do wybranych śrub zamocowano przetworniki piezoelektryczne (jako wzбудniki i odbiorniki) w celu zarejestrowania przebiegów fal sprężystych. W trakcie badań zaobserwowano, że zmiany obciążenia wywołują także zmiany w rejestrowanych sygnałach. Na tej podstawie podjęto próbę zastosowania fal sprężystych i sieci neuronowych w zadaniu identyfikacji i monitorowania sił w śrubie. Zagadnienie to staje się istotne zwłaszcza w przypadku połączeń sprężonych, ponieważ z powodu zjawiska relaksacji stali siła sprężająca z upływem czasu może się obniżać.

Ostatnie z omówionych zagadnień dotyczyło identyfikacji parametrów materiałowych (rozdział 7.). Założono, że możliwe jest lokalne określenie modułu Younga badanego fragmentu elementu powierzchniowego na podstawie zmian w doświadczalnie wyznaczonych krzywych dyspersji. Zjawisko dyspersji oraz wielopostaciowość fal sprężystych ma miejsce w materiałach, których grubość jest porównywalna z długością fal (są to tzw. fale Lamba). Zbiór danych potrzebnych do trenowania sieci neuronowych wygenerowany został z wykorzystaniem pół-analitycznego rozwiązania numerycznego. Na tej podstawie przeprowadzono analizę wrażliwości zmian wybranych parametrów na krzywe dyspersji. Doświadczalne pomiary kontrolne przeprowadzone zostały na arkuszu blachy (materiał izotropowy) oraz kompozytu (materiał ortotropowy). Pomimo zaobserwowanego braku pełnej zgodności danych numerycznych i doświadczalnych

przedstawiona idea może być wykorzystana do identyfikowania wybranych parametrów materiałowych¹.

2.2. Przykłady zastosowań sieci neuronowych

W monografii omówiono wybrane przykłady zastosowania sztucznych sieci neuronowych w zadaniach diagnostyki konstrukcji i jej elementów. Jako źródła informacji o zmianach zachodzących w badanych próbkach i modelach użyto czasowych sygnałów fal sprężystych. Przedstawiony algorytm pozwala na dwuetapową realizację zadania identyfikacji, polegającego na klasyfikacji wzorców oraz na predykcji parametrów wykrytych anomalii. Jego działanie zweryfikowano zarówno w odniesieniu do elementów o różnych kształtach (pasma, panel, pręt okrągły, połączenie słupa z rygłem, śruba), jak i wykonanych z materiałów stosowanych obecnie w budownictwie (stal, aluminium, kompozyt GFRP i CFRP). Zamieszczone wyniki pozwalają na porównanie różnych algorytmów wnioskowania oraz zastosowanych technik pomiarowych ze względu na czułość i dokładność diagnostyki.

Na pierwszym etapie identyfikacji omówione przykłady obejmowały następujące **zadania klasyfikacji zmian** związane z:

- nacięciami wprowadzonymi do pasma stalowego (przykład złożonego sygnału trudnego do oceny wizualnej),
- uszkodzeniami termicznymi w pasmie kompozytowym GFRP,
- uszkodzeniami (korozja chemiczna i uderzenie) w arkuszu kompozytowym GFRP,
- poluzowaniem wybranych rzędów śrub w połączeniu rygła ze słupem (rama stalowa),
- otworami o różnych średnicach wprowadzonymi do pasma aluminium w dwóch położeniach.

W przypadku **zadań identyfikacji parametrów** wykrytych zmian (drugi poziom działania systemu diagnostycznego) zamieszczone przykłady dotyczyły:

- oszacowania wysokości i szerokości nacięcia w pasmie stali,
- identyfikacji poziomów uszkodzenia termicznego w pasmie kompozytu GFRP,
- oszacowania współrzędnych anomalii wprowadzanych w arkuszu CFRP,
- predykcji wielkości siły osiowej w ściskanym pręcie aluminiowym,
- predykcji wielkości siły osiowej w pojedynczej śrubie oraz śrubach rozciąganego połączenia kołnierzonego,
- identyfikacji parametrów materiałowych w arkuszach aluminium i kompozytu.

¹Zamieszczone w opracowaniu wyniki stanowią część prac realizowanych w ramach grantu badawczego „Teoretyczne podstawy monitorowania stanu technicznego konstrukcji przez rozwiązywanie zagadnienia odwrotnego z uwzględnieniem niepewności” pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. T. Uhla (NCN 2011/01/B/ST8/07210), w którym autor uczestniczył jako współwykonawca.

Ze względu na **techniki pomiarowe** rozpatrzono:

- analizę sygnałów w układzie impuls–echo oraz impuls–przejście,
- pomiary w układzie wzbudnik–czujnik oraz z zastosowaniem siatek przetworników piezoelektrycznych,
- wykorzystanie urządzeń pomiarowo-rejestrujących opartych zarówno na przetwornikach piezoelektrycznych (LCO, PAQ), jak i pomiarach bezkontaktowych (LDV).

W zakresie miękkich metod obliczeniowych zastosowano:

- w zadaniach klasyfikacji dwu- i wieloklasowej
 - autoasocjacyjne sieci neuronowe (ANN),
 - maszyny wektorów wspierających (SVM),
 - ANN i SVM w układzie drzewa decyzyjnego (DT),
 - standardowe sieci neuronowe (SNN) z przypisanymi na wyjściu etykietami klas;
- w zadaniach identyfikacji parametrów – standardowe sieci neuronowe (SNN) do zadań regresji.

Większość przedstawionych przykładów, poza jednym dotyczącym identyfikacji stałych materiałowych, opierała się na wynikach pomiarów doświadczalnych. Zadania te podzielone zostały na pięć grup, którym odpowiadają kolejne rozdziały monografii. Najważniejsze z uzyskanych wyników i wniosków przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

2.3. Najważniejsze wyniki i wnioski

2.3.1. Klasyfikacja i identyfikacja zmian

Przeprowadzone badania doświadczalne polegały na pomiarach fal sprężystych w pasmach stali i GFRP, panelach kompozytów GFRP/CFRP oraz w ryglu laboratoryjnego modelu ramy stalowej. Zastosowanie PCA pozwoliło na znaczne zmniejszenie wymiaru przetwarzanych danych pomiarowych i wykorzystanie ich w procesie trenowania algorytmu diagnostycznego.

Uzyskane wyniki wykrywania anomalii pokazały, że w przypadku analizowanych próbek materiałów i modeli konstrukcji możliwe było wykrycie wprowadzonych zmian już na wczesnym etapie ich rozwoju. Klasyfikację pozwalającą na rozdzielenie wzorców związanych z różnego rodzaju usterkami i stanem normalnym można z powodzeniem przeprowadzić za pomocą ANN oraz SVM. Rozdzielenie pośrednich klas związanych z kolejnymi etapami wzrostu uszkodzenia lub występowaniem innych typów nieciągłości możliwe było po zastosowaniu ANN i SVM zorganizowanych w strukturę DT. Ponadto w przypadku arkusza GFRP do zidentyfikowania poszczególnych przypadków uszkodzeń użyto SNN do zadań regresji, co pozwoliło na bezbłędne ich rozdzielenie.

Do identyfikacji wielkości uszkodzenia na drugim etapie algorytmu diagnostycznego zastosowano SNN. Uzyskana dokładność oszacowania wysokości i szerokości nacięcia wprowadzonego do pasma stalowego wyniosła od $5 \cdot 10^{-6}$ do 0,567 mm. W przypadku arkusza CFRP możliwe było wykrycie wszystkich zasymulowanych anomalii związanych ze zmiennym położeniem zacisku śrubowego. Ze względu na dostrzeżony brak powtarzalności w kilku zarejestrowanych sygnałach dokładność identyfikacji położenia anomalii obarczona była znacznym błędem ($R^2 = 0,781$).

W przypadku modelu laboratoryjnego ramy stalowej przeprowadzona klasyfikacja z wykorzystaniem ANN pozwoliła jednoznacznie stwierdzić, że wystąpiła usterka oraz wskazać, którego wężła ona dotyczy (lewy, prawy). Dzięki temu możliwe było wskazanie wężła ramy wymagającego kontroli technicznej momentu dokręcenia śrub. Badania te powinny być kontynuowane, ponieważ na obecnym ich etapie uzyskane wyniki klasyfikacji nie pozwalały precyzyjniej wskazać, który rząd śrub został poluzowany. Założyć jednak można, analogicznie do przykładu rozdzielenia wzorców w arkuszu GFRP, że zadanie to da się rozwiązać za pomocą SNN do zadań regresji.

2.3.2. Porównanie technik pomiarowych

Na dwóch pasmach aluminium przeprowadzono badania doświadczalne wykorzystujące trzy różne zestawy pomiarowe. Do rejestracji sygnałów użyto oscyloskopu cyfrowego (LCO), systemu do akwizycji fal sprężystych (PAQ) oraz wibrometru laserowego 3D (LDV). W badanych próbkach wywiercono otwory symulujące pojawienie się uszkodzenia.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji trenowania systemu diagnostycznego stwierdzono, że w analizowanym przypadku największą dokładność klasyfikacji osiągnięto wykorzystując dane zarejestrowane przez oscyloskop cyfrowy (LCO). Natomiast największym błędem klasyfikacji obarczone były wyniki trenowania NN związane z sygnałami zarejestrowanymi za pomocą wibrometru laserowego LDV, zwłaszcza w przypadku składowych prędkości X oraz Y – w płaszczyźnie próbki. Do wyznaczenia składników głównych posłużono się w tym przypadku surowymi danymi pomiarowymi bez ich filtrowania.

Otrzymanych wyników nie należy jednak traktować zbyt kategorycznie, ponieważ uzyskane z pomiarów częstotliwości próbkowania sygnałów czasowych fal sprężystych znacznie się od siebie różnią (zależnie od zastosowanego układu pomiarowo-rejestrującego). Warto także zwrócić uwagę, że realizacja pomiarów bezkontaktowych nie daje gwarancji trafiania wiązki lasera dokładnie w ten sam punkt pomiarowy. Badane pasma były wielokrotnie demontowane i pomimo umieszczenia na nich znacznika kontrolnego dokładność umiejscowienia wiązki lasera w przyjętym punkcie pomiarowym jest w praktyce trudna do zweryfikowania. Z tego względu jako jeden z kierunków dalszych prac wskazać można konieczność poprawienia dokładności realizowanych pomiarów bezkontaktowych oraz uwzględnienie ich niepewności w trakcie trenowania systemu diagnostycznego (np. rozważając pomiary w kilku położeniach wiązki lasera wokół punktu kontrolnego lub przez losowe przesunięcia zmierzonych sygnałów w czasie, których zakres można ustalić eksperymentalnie).

W przyszłych pracach warto rozszerzyć to zadanie o sprawdzenie działania algorytmu diagnostycznego na drugim etapie identyfikacji, który mógłby uwzględnić

oszacowanie średnicy wywierconego otworu. Pozwoli to na weryfikację dokładności wnioskowania na podstawie różnych systemów pomiarowych.

2.3.3. Sygnały o obniżonej jakości

Przeprowadzone badania polegały na sztucznym obniżaniu jakości zmierzonych sygnałów przez ich decymowanie, okienkowanie i zaszumienie. Ich celem było zmniejszenie ilości przetwarzanych danych, co wpływa na czas i wysiłek obliczeniowy. Uzyskane wyniki pokazały, że możliwe jest sygnalizowanie występowania uszkodzeń na podstawie sygnałów o względnie niskiej częstotliwości próbkowania. Co więcej, wydaje się, że pozornie nieczytelne fragmenty sygnału (z powodu wielokrotnych odbić od krawędzi próbki) mogą nieść znaczną ilość informacji o stanie badanego elementu i występujących w nim uszkodzeniach. Z punktu widzenia trenowania systemu diagnostycznego na podstawie sygnałów impuls-echo można się spodziewać, że najwięcej informacji o stanie badanego elementu znajdować się będzie w dalszych częściach przebiegu czasowego fali sprężystej, a nie w początkowym jego fragmencie. Było to najbardziej widoczne, gdy baza wzorów została rozszerzona o sygnały ze sztucznie wygenerowanym losowym szumem.

Biorąc pod uwagę wyniki klasyfikacji w przypadku okna czasowego przesuwanego się wzdłuż osi czasu, system diagnostyczny był w stanie wykryć uszkodzenia nawet w przypadku dość złożonych sygnałów, które zupełnie nie nadają się do oceny wizualnej (przykład pasma GFRP). Ponadto decymacja i wybór wąskich okien czasowych są w stanie przyspieszyć obliczenia na etapie przetwarzania sygnału. Przeprowadzenie podobnej analizy w zadaniach klasyfikacji lub identyfikacji konkretnych typów uszkodzeń umożliwi dobranie takich parametrów pomiaru, które pozwolą na bezbłędne wykrywanie uszkodzeń oraz oszacowanie ich parametrów na akceptowalnym poziomie dokładności.

Pomimo że prowadzenie podobnych badań jest dość czasochłonne, ten problem może wymagać dalszych badań z uwzględnieniem innych rodzajów uszkodzeń.

2.3.4. Identyfikacja sił osiowych

W zadaniu identyfikacji sił osiowych omówiono wyniki dwóch doświadczeń polegających na analizie sygnałów fal sprężystych propagujących w ściskanym pręcie aluminiowym i w śrubach rozciąganego połączenia kołnierzewego.

Uzyskane wyniki badań dowodzą, że na podstawie zmian parametrów fal sprężystych możliwe było oszacowanie wielkości sił w analizowanym pręcie ściskanym. W zakresie obciążeń do 2000 N największe błędy predykcji nie przekraczały 80 N, co stanowi 4% zakresu obciążenia.

Sieci neuronowe były w stanie znaleźć także związek pomiędzy zmianami wartości sił w śrubach oraz wyznaczonymi parametrami zarejestrowanych fal sprężystych. Względny błąd przeprowadzonego oszacowania okazał się mniejszy niż 2%, gdy wzorce do testowania i walidacji wybrano w sposób równomierny. Okazało się jednak, że wyznaczone składniki główne sygnałów nie zawierają wystarczająco dokładnych informacji, aby na ich podstawie precyzyjnie oszacować wielkości sił osiowych w śrubach, które nie zostały uwzględnione w bazie wzorców uczących, nawet w odniesieniu do tego samego połączenia. Sygnały zmierzone w poszczególnych śrubach wykazywały między sobą dość

znaczące różnice i prawdopodobnie dlatego na tym etapie badań wytrenowane SNN nie nabyły odpowiednich zdolności do generalizacji, aby z zadowalającą dokładnością przewidywać wielkości nieznanymi sił. Z tego względu zagadnienie to wymaga dalszych badań w przyszłych pracach.

2.3.5. Identyfikacja parametrów materiałowych

Zadanie identyfikacji parametrów materiałowych arkusza aluminium i kompozytu opierało się na zmianach wyznaczanych krzywych dyspersji. Baza wzorców stworzona na podstawie półanalitycznego rozwiązania posłużyła do trenowania SNN. Na jej wyjściu oczekiwano oszacowania identyfikowanych parametrów materiału (przede wszystkim modułu Younga). Analizowano przy tym możliwość opisywania wyznaczonych punktów krzywych dyspersji przez parametry funkcji aproksymacyjnej oraz zawężenie ich liczby do określonego zakresu częstotliwości.

Wyniki uzyskane dla materiału izotropowego są w dobrej zgodności z wartościami, które oszacowane zostały innymi metodami. W przypadku materiału ortotropowego analizowano podejście polegające na dopasowaniu doświadczalnie wyznaczonej krzywej dyspersji do danych z bazy wzorców, aby na tej podstawie oszacować parametry materiału. Wykorzystano do tego metodę najmniejszych kwadratów (LS). Różnice w dokładności identyfikacji zależały od wyboru krzywej dyspersji (formy A_0 lub S_0). Wzbudza to pewną wątpliwość, na ile wykorzystany model półanalityczny precyzyjnie opisywał analizowane zjawisko dyspersji fal Lamba. Dysponując jednak odpowiednią (spójną) bazą wzorców krzywych dyspersji, można przypuszczać, że oba przedstawione podejścia przyniosą oczekiwane rezultaty.

Osiągnięciem autora było zaproponowanie koncepcji, w której wektor wejściowy SNN bazuje wprost na wybranych czterech wartościach liczb falowych zamiast opisywania krzywych dyspersji współczynnikami funkcji aproksymacyjnej.

2.4. Wnioski z przeprowadzonych badań

Głównym celem monografii było wykazanie możliwości zastosowania zaproponowanego systemu diagnostycznego do wykrywania różnego typu zmian w badanych próbkach i modelach wykonanych z różnych materiałów, a także identyfikowania ich parametrów. Na podstawie zamieszczonych w monografii wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- możliwe było zbudowanie dwuetapowego algorytmu diagnostycznego realizującego dwa etapy identyfikacji zmian (powodowanych przez różne czynniki) pojawiających się w konstrukcjach i jej elementach,
- miękkie metody obliczeniowe (ANN, SNN, SVM) oraz fale sprężyste można z powodzeniem stosować w zadaniach wykrywania i oceny zmian różnego pochodzenia (usterki, uszkodzenia, korozja, zmiany obciążenia),
- zaproponowane podejście nie ogranicza się do konkretnego typu występujących anomalii ani rodzaju materiału, z jakiego wykonany jest obiekt badań (przeanalizowano różne warianty),

- przedstawiony algorytm diagnostyczny pozwala wnioskować na podstawie prostych i złożonych sygnałów fal sprężystych zarejestrowanych w różnych konfiguracjach (np. impuls–echo, impuls–przejście),
- zastosowanie ANN i SVM w układzie DT pozwoliło na przeprowadzenie bezbłędnej klasyfikacji wieloklasowej analizowanych zmian, co poprawiło dotychczas uzyskiwane wyniki,
- dobre wyniki klasyfikacji wieloklasowej uzyskano dodatkowo dzięki zastosowaniu SNN do zadań regresji,
- możliwe jest wykrywanie usterek już we wczesnym etapie ich rozwoju (w odniesieniu do najmniejszych z rozważanych przypadków nacięć, średnic otworów, uszkodzeń termicznych),
- w konkretnych zastosowaniach możliwe było obniżenie jakości sygnałów i przeprowadzenie na ich podstawie poprawnej klasyfikacji wzorców (także w przypadku uszkodzeń we wczesnym etapie rozwoju),
- dokładność klasyfikacji i zbieżność procesu trenowania okazała się lepsza w przypadku sygnałów zarejestrowanych za pomocą czujników piezoelektrycznych (LCO) niż technik bezkontaktowych (LDV),
- analiza składników głównych PCA najczęściej pozwala wydobyć z sygnałów fal sprężystych parametry, które dobrze opisują ich cechy (zmiany), redukując jednocześnie wielkość wektorów wejściowych NN,
- przedstawione podejście pozwala na automatyczne przetwarzanie danych pomiarowych oraz przeprowadzanie procesu wnioskowania, co ma ogromne znaczenie w systemach monitorowania stanu konstrukcji (SHM).

2.5. Oryginalne elementy pracy

W odniesieniu do przedstawionej idei działania systemu diagnostycznego oraz omówionych wyników zrealizowanych badań można wskazać liczne elementy potwierdzające aktualność podejmowanej problematyki i oryginalność zaproponowanych rozwiązań. Zalicza się do nich:

- weryfikację działania omawianego algorytmu diagnostycznego w odniesieniu do materiałów kompozytowych GFRP i CFRP – pierwsze prace w tym zakresie dotyczyły badania pasm wykonanych z materiałów izotropowych,
- zastosowanie rozwijanego algorytmu diagnostycznego w analizie elementów dwuwymiarowych bazujących na sieciach czujników,
- wykorzystanie idei drzewa decyzyjnego (DT) do przeprowadzania klasyfikacji wieloklasowej z wykorzystaniem ANN i SVM,

- porównanie dokładności i zbieżność procesu trenowania systemu diagnostycznego na podstawie różnych technik pomiarowo-rejestrujących – w analizowanych przypadkach dwóch pasm aluminium dane uzyskane za pośrednictwem przetworników piezoelektrycznych pozwoliły na osiągnięcie dokładnej klasyfikacji wzorców, natomiast wnioskowanie na podstawie pomiarów bezkontaktowych obarczone było większym błędem,
- wykazanie możliwości przeprowadzania wnioskowania na podstawie sygnałów o znacznie obniżonej jakości (decymacja, zaszumienie) i ograniczonych do wybranego zakresu analizowanych przebiegów czasowych fal sprężystych (okienkowanie),
- wykazanie, że w sygnałach impuls–echo występują obszary związane zwykle z kolejnymi przejściami fali padającej przez obszar z uszkodzeniem, które niosą ze sobą znacznie więcej informacji niż w przypadku sygnałów zarejestrowanych w konfiguracji impuls–przejście,
- podjęcie próby identyfikowania sił osiowych w elementach ściskanych i rozciąganych,
- wykazanie, że wrażliwość krzywych dyspersji na zmiany parametrów materiałowych nie jest jednakowa (np. są one bardziej wrażliwe na zmiany modułu Younga, Kirchhoffa i gęstości niż na zmiany grubości materiału) i w różnym stopniu dotyczą one krzywych A_0 i S_0 ,
- wykazanie, że ograniczenie zakresu krzywych dyspersji do wybranego pasma częstotliwości i potraktowanie wartości punktowych jako wejścia do NN pozwala oszacować identyfikowane parametry materiałowe.

Poparte różnymi przykładami zadania klasyfikacji wzorców i predykcji identyfikowanych parametrów wnoszą istotny wkład w popularyzację miękkich metod obliczeniowych i pokazanie praktycznych ich zastosowań w obszarze nieniszczących technik badania konstrukcji (NDT) oraz systemów monitorowania ich stanu (SHM).

2.6. Zastosowania praktyczne

Omówiona w pracy idea działania systemu diagnostycznego pozwala zrealizować wybrane poziomy identyfikacji zachodzących w konstrukcji zmian, związanych przede wszystkim z ich: detekcją, lokalizacją, klasyfikacją, oceną wielkości. Możliwe jest jej wykorzystanie w zagadnieniach związanych z zadaniami identyfikacji parametrów (np. materiałowych), obciążeń czy sił wewnętrznych. Jej zastosowanie możliwe jest także w innych zagadnieniach, związanych np. z bezpieczeństwem konstrukcji i szacowaniem pozostałego bezpiecznego czasu jej użytkowania. Za każdym razem będzie to wymagać zbudowania bazy wzorców (numerycznie lub doświadczalnie), uwzględniającej konkretną lokalizację punktów pomiarowych oraz scenariusze różnych przypadków związanych z prawidłowym i awaryjnym stanem pracy konstrukcji.

Poza potencjalnymi zastosowaniami rozwijanego podejścia w obszarze diagnostyki różnego rodzaju konstrukcji inżynierskich i ich elementów, możliwe jest także zaimplementowanie go w diagnostyce maszyn i urządzeń. Dużą zaletę omówionej idei stanowi

możliwość automatyzacji procesów związanych z rejestracją, przetwarzaniem sygnałów i wnioskowaniem, co w znacznym stopniu przyspiesza diagnostykę, zwiększa dostępność inspekcji i stanowi podstawę funkcjonowania systemów ciągłego monitorowania.

2.7. Kierunki dalszych badań

Duża część przedstawionych w monografii zagadnień wymaga kontynuowania badań, wiele z nich pozostaje otwartych i czeka na rozwiązania. Jako kierunki dalszych badań związanych z zastosowaniem zjawiska fal sprężystych i sztucznych sieci neuronowych w diagnostyce konstrukcji można wskazać:

- przeprowadzenie analizy wyników wnioskowania ze względu na różne położenia punktów pomiarowych, co może wpływać na czułość i dokładność omawianego podejścia – dość łatwo można to zrealizować wykorzystując pomiary bezkontaktowe wibrometrem laserowym,
- podjęcie próby przewidywania położenia uszkodzeń na podstawie obliczonych wartości NI w zadaniach wykorzystujących sieci czujników za pomocą metod obrazowania, np. wprowadzających pojęcie indeksu gęstości prawdopodobieństwa (PDI),
- konieczność poprawienia dokładności realizowanych pomiarów bezkontaktowych (wyższa rozdzielczość próbkowania i precyzja trafiania w przyjęte punkty pomiarowe) oraz uwzględnienie ich niepewności w trakcie trenowania systemu diagnostycznego (np. losowe przesunięcia zmierzonych sygnałów w czasie, których zakres ustalić można eksperymentalnie),
- konieczność kontynuowania prac związanych z identyfikacją sił osiowych w śrubach w celu poprawy zdolności generalizacyjnych NN i dokładności predykcji, ponieważ
 - uniezależnienie się od różnic występujących w sygnałach pochodzących z różnych śrub w danym połączeniu wymagać może zastosowania parametrów innych niż składniki główne,
 - poprawienia wymaga powtarzalność instalowania przetworników piezoelektrycznych,
 - w praktyce wygodniejsze jest przeprowadzenie pomiarów w konfiguracji czujników impuls–echo i pozwala ono na diagnozowanie połączeń z jednostronnym tylko dostępem do łba lub trzpienia śruby;
- przeprowadzenie badań uwzględniających zmienność warunków pracy konstrukcji (np. obciążenia statyczne i pozastatyczne) oraz wpływu otoczenia (np. zmiany temperatury, działania wiatru),
- badania doświadczalne zmierzające do praktycznych zastosowań przedstawionego systemu diagnostycznego w zadaniach diagnozowania i monitorowania stanu konstrukcji budowlanych (np. wykrywanie stanów awaryjnych, zmian wynikających z różnego rodzaju uszkodzeń, degradacji materiału, spadku siły w łącznikach,

wspomagania decyzji o konieczności odciążenia konstrukcji, zlecenie odśnieżania na podstawie wielkości zidentyfikowanych obciążeń lub ugięć).

Przedstawione w monografii wyniki dotyczyły zastosowania klasycznych metod miękkich (SNN, ANN, SVM) w zadaniach klasyfikacji oraz identyfikacji parametrów. W ostatnim czasie można jednak zaobserwować renesans tych metod ze względu na liczne zastosowania splotowych sieci neuronowych (CNN) w obszarze rozpoznawania obrazów. Jako kierunek dalszych badań wskazać także można zbadanie użyteczność głębokich sieci neuronowych w dziedzinie NDT/SHM oraz poszukiwanie nowych metod pozwalających na poprawienie wydajności, czułości i zdolności generalizacyjnych systemów diagnostycznych.



3.

Inne zagadnienia naukowo-badawcze

3.1. Wykrywanie uszkodzeń w podporach ścian osłonowych

Jeden z tematów badawczych analizowanych w przeszłości przez habilitanta dotyczył wykrywanie uszkodzeń w podporach ścian osłonowych. Zagadnienie to jest częściowo związane z tematem monografii habilitacyjnej, jednak nie zostało w niej ujęte, ponieważ wnioskowanie o występowaniu uszkodzenia opierało się na odczycie przemieszczeń, a nie na zjawisku propagacji fal sprężystych. Chodziło w tym przypadku o wskazanie podpory, w której brakować może łącznika. Przyjęto przy tym, że przeprowadzenie inspekcji wizualnej nie jest w pełni możliwe ze względu na brak dostępu do połączeń po zamontowaniu fasady szklano-aluminiowej. Do trenowania sieci neuronowych posłużyły numerycznie wyznaczone przemieszczenia w punktach kontrolnych zlokalizowanych na słupkach i ryglach ściany osłonowej. Uszkodzenia podpór modelowane były przez procentową redukcję ich sztywności. Ze względu na liczbę możliwych kombinacji uszkodzeń i czas obliczeń modelu MES, bazę wzorców uszkodzenia ograniczono tylko do wybranych przypadków. Liczba wygenerowanych w tym zadaniu wzorców okazała się jednak zbyt mała, aby uzyskać dokładność identyfikacji na zadowalającym poziomie. Zredukowanie sztywności podpory z 50% do 80% spowodowało zmniejszenie bezwzględnego błędu identyfikacji z 27,7% do 8,6%. Z tego powodu, jako kierunek dalszych wskazuje konieczność stworzenia większej bazy wzorów uszkodzeń. Pozwoli to na zweryfikowanie skuteczności przyjętego podejścia do wykrywania uszkodzeń na podstawie pomiarów przemieszczeń konstrukcji.

Zagadnienie wykrywania uszkodzeń w podporach ścian osłonowych realizowane było w trakcie rocznego stażu naukowego realizowanego na Uniwersytecie Arystotelesa w Salonikach. Habilitant odpowiadał za etap związany z definiowaniem bazy wzorców, opracowanie algorytmu i proces trenowanie sieci neuronowych oraz analizę i raportowanie uzyskanych wyników.

3.2. Badania i analiza drgań narzędzi w procesach obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym

W wyniku przeprowadzonych prac badawczych opracowane zostały dwie procedury pomiarowe wykorzystujące wibrometrię laserową, w celu określania amplitud oscylacji narzędzi obrabiarek wspomaganych ultradźwiękami. Przeprowadzone doświadczenia

udowodniły, że pomimo ograniczeń wykorzystania wibrometru do pomiarów poza procesem obróbki, opracowane procedury stanowią cenne źródło wiedzy wspomagającej optymalny dobór nastaw w procesie obróbki ubytkowej. Wykazano również, że pomiary charakterystyk częstotliwościowo-amplitudowych mogą być pomocne w wykrywaniu wadliwego działania opravek ze wzbudnikami drgań.

Za pomocą wibrometru laserowego możliwy był także pomiar osiowych i promieniowych drgań narzędzi oraz rejestrowanie wielkości przemieszczeń na jego wysokości (profil). Do zrozumienia zachodzących w narzędziach zjawisk przyczynia się przestrzenny pomiar wibrometrem 3D oraz możliwość wizualizacji otrzymanych wyników.

Główny cel badań stanowiło zarejestrowanie drgań i określanie amplitud oscylacji wybranych narzędzi stosowanych w procesach obróbki ze wspomaganie ultradźwiękami. Wielkości zmierzone za pomocą wibrometru laserowego zostały dodatkowo porównane z wynikami pomiarów wykorzystujących technikę prądów wirowych. Uzyskane wyniki wykazują zgodność zakresu wyznaczonych amplitud, a jednocześnie dowodzą słuszności przyjętych procedur pomiarowych. Wykazano tym samym, że za pomocą wibrometrów laserowych można z powodzeniem określić amplitudy oscylacji narzędzi, co stanowi cenne źródło wiedzy wspomagającej optymalny dobór nastaw w procesie obróbki ubytkowej.

Badania zostały zrealizowane w ramach współpracy habilitanta z pracownikami Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa, która zaowocowała realizacją wspólnego projektu w Programie Badań Stosowanych (PBS2/B6/17/2013) pt. *Technologia wysokowydajnej obróbki ze wspomaganie ultradźwiękowym przedmiotów ceramicznych o złożonej geometrii*. Efektem tych prac jest cykl publikacji dotyczących pomiarów i analizy drgań narzędzi obrabiarek, których habilitant jest współautorem.

3.3. Zastosowanie sieci neuronowych do kalibracji modeli mikrosymulacyjnych

Modele mikrosymulacyjne ruchu drogowego są wykorzystywane do przeprowadzania złożonych analiz przepustowości, oceny warunków ruchu oraz logiki sterowania sygnalizacją świetlną. Budowa modeli mikrosymulacyjnych ruchu drogowego jest procesem długotrwałym i złożonym. Wymaga nie tylko przeprowadzenia badań ruchu i odwzorowania sieci drogowej ale również uwzględnienia zachowań kierowców. Proces kalibracji modeli ruchu zakłada przeprowadzenie serii symulacji prowadzących do uzyskania modelu bazowego odzwierciedlającego aktualny stan na danym odcinku drogi. Jedną z możliwości kalibracji modeli jest metoda eksperymentalna, w której użytkownik ręcznie zmienia parametry modelu. W celu przyspieszenia prac możliwe jest wykorzystanie odpowiednich struktur matematycznych, które umożliwią wygenerowanie najlepszej kombinacji zmiennych. Jedną z metod umożliwiającą właściwe skonfigurowanie modelu stanowią sztuczne sieci neuronowe. Są one stosowane do rozwiązywania wielu praktycznych problemów, w których proces otrzymania wyników na podstawie wprowadzonych danych wejściowych jest skomplikowany i trudny do opisanie lub przewidzenia. Habilitant współpracował przy opracowaniu kompleksowego algorytmu umożliwiającego kalibrację modeli ruchu.

Największym wyzwaniem kalibracji modelu była konieczność przetestowania dużej liczby wzorców w programie mikrosymulacyjnym, co przekładało się na relatywnie długi

czas obliczeń. Ponadto odtworzenie tak skomplikowanego algorytmu nie jest proste, dlatego w przeprowadzonych analizach zaproponowano uproszczoną metodę kalibracji wykorzystującą miękkie metody obliczeniowe.

Koncepcja ta polega na zastąpieniu czasochłonnych symulacji w dedykowanych do tego celu programach uprzednio wytrenowaną do tego celu siecią neuronową. Trenowanie wymaga jednak utworzenia początkowej bazy wzorców, które zostaną wykorzystane do uczenia się sieci. Wykorzystując następnie jej zdolności do generalizacji możliwe jest bardzo szybkie oszacowanie średnich czasów przejazdu. Pozwoliło to znaleźć zestaw parametrów wejściowych, które odpowiadają zakładanym czasom przejazdu. Walidacja tych parametrów w programie Vissim pokazała dobrą ich zgodność.

Wkładem własnym habilitanta są prace związane z opracowaniem koncepcji wykorzystania sieci neuronowych, napisania skryptu programu Matlab służącego do ich trenowania, analizy i opracowania wyników. Efektem przeprowadzonych badań jest artykuł, którego habilitant jest współautorem (Szarata, Nazarko 2017).

Piotr Nazarko